

# RAPPORT DE CONJONCTURE

## du Comité national de la recherche scientifique



**CNRS ÉDITIONS**

15, rue Malebranche – 75005 Paris



## **Sommaire**

---

Préface du Président du CNRS	V
Avant-propos du Président du Conseil scientifique du CNRS	VII
<b>RAPPORTS DES 40 SECTIONS DU COMITÉ NATIONAL</b>	<b>1</b>
01 Mathématiques et interactions des mathématiques	3
02 Théories physiques : méthodes, modèles et applications	9
03 Interactions, particules, noyaux du laboratoire au cosmos	33
04 Atomes et molécules, optique et lasers, plasmas chauds	49
05 Matière condensée : organisation et dynamique	69
06 Matière condensée : structures et propriétés électroniques	93
07 Sciences et technologies de l'information (informatique, automatique, signal et communication)	121
08 Micro et nano-technologies, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique	139
09 Ingénierie des matériaux et des structures, mécanique des solides, acoustique	169
10 Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation	187
11 Systèmes supra et macromoléculaires : propriétés, fonctions, ingénierie	203
12 Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes et propriétés	231
13 Physicochimie : molécules, milieux	243
14 Chimie de coordination, interfaces et procédés	265
15 Chimie des matériaux, Nanomatériaux et procédés	295
16 Chimie du vivant et pour le vivant : conception et propriétés de molécules d'intérêt biologique	313
17 Système solaire et univers lointain	329
18 Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles	359
19 Système terre : Enveloppes superficielles	377
20 Surface continentale et interfaces	389
21 Bases moléculaires et structurales des fonctions du vivant	403
22 Organisation, expression et évolution des génomes	405

23	Biologie cellulaire : organisation et fonctions de la cellule ; processus infectieux et relations hôte/ pathogène	417
24	Interactions cellulaires	433
25	Physiologie moléculaire et intégrative	445
26	Développement, évolution, reproduction, cellules souches	463
27	Comportement, cognition, cerveau	489
28	Biologie végétale intégrative	509
29	Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des Macromolécules aux communautés	527
30	Thérapeutique, pharmacologie et bio-ingénierie	545
31	Hommes et Milieux : évolution, interactions	571
32	Mondes anciens et médiévaux	603
33	Mondes modernes et contemporains	621
34	Langues, langage, discours	635
35	Philosophie, histoire de la pensée, sciences des textes, théorie et histoire des littératures et des arts	653
36	Sociologie, normes et règles	727
37	Économie et Gestion	745
38	Sociétés et cultures : approches comparatives	773
39	Espaces, territoires et sociétés	791
40	Politique, pouvoir, organisation	807
	<b>RAPPORTS DES QUATRE COMMISSIONS INTERDISCIPLINAIRES</b>	<b>831</b>
42	Sciences de la Communication	833
43	Modélisation des systèmes biologiques, bioinformatique	845
44	Cognition, langage, traitement de l'information, systèmes naturels et artificiels	859
45	Dynamique des systèmes environnementaux, développement durable, santé et société	883
	<b>RAPPORT DE PROSPECTIVE DES HUIT CONSEILS SCIENTIFIQUES DE DÉPARTEMENT</b>	<b>901</b>
	Environnement et développement durable	903
	Mathématiques, physique, planète et univers	905
	Physique nucléaire et physique des particules	907
	Planète et univers	909
	Sciences du vivant	927
	Sciences humaines et sociales	933
	Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie	935
	Chimie	937
	Index des auteurs	959

## **Préface**

---

Le Comité national de la recherche scientifique a pour mission statutaire de procéder à l'analyse de la conjoncture scientifique et de ses perspectives. Ce nouveau rapport de conjoncture, résultat d'une consultation très large des communautés scientifiques, se positionne comme un outil de référence dans le paysage de la recherche nationale.

Il est publié à un moment charnière de l'évolution du système français de recherche et d'innovation, à l'issue de la mise en place opérationnelle de la loi relative aux libertés et responsabilités des universités et au moment de l'émergence de pôles universitaires d'excellence avec de véritables politiques scientifiques de site dans lesquels le CNRS est fortement impliqué.

Pour construire cette dynamique de progrès, ce rapport revêt une importance accrue par l'analyse exceptionnelle des connaissances qu'il nous propose. Développant à la fois une vision disciplinaire et interdisciplinaire sur les grands enjeux scientifiques et sociétaux auxquels le CNRS doit répondre, dans une perspective européenne et internationale, ce rapport contribuera utilement aux réflexions stratégiques amorcées par les composantes de la recherche nationale.

Je remercie toutes celles et tous ceux qui ont contribué à cette œuvre collective et, en premier lieu, les membres des sections du Comité national de la recherche scientifique, des Conseils scientifiques d'Instituts et du Conseil scientifique du CNRS.

*Alain FUCHS*

*Président du CNRS*



## **Avant-propos**

---

Le CNRS occupe toujours une place originale dans le paysage de la recherche. L'organisme dispose d'une capacité de mener et de faire mener des recherches sur le long terme grâce à son premier atout : ses 33 000 chercheurs et ITA statutaires qui y travaillent à plein temps et le financement de ses 1 000 laboratoires généralement associés à l'université sous forme d'UMR. Depuis cette année 2010, il faut intégrer une nouvelle organisation du CNRS en 10 instituts (INSB, INEE, INSHS, INC, ISN2I, INSIS, INSMI, INP, IN2P3, INSU). La force du CNRS, c'est aussi de conjuguer une vision nationale avec une implantation de laboratoires bien insérée dans le tissu universitaire.

Mis en place pour une période de quatre ans, les sections du COmité National de la Recherche Scientifique exercent un double rôle. D'une part, ces instances évaluent le travail scientifique des chercheurs de l'organisme, d'autre part, elles donnent un avis de pertinence scientifique stratégique (et non plus d'évaluation scientifique) concernant les laboratoires propres ou associés au CNRS au travers de leur organisation, de leur production scientifique, de leur dynamisme et de leur créativité. Ce travail d'évaluation et d'avis s'effectue de manière collégiale et contradictoire, avec des membres élus par les pairs et des membres nommés par le ministère sur proposition de l'organisme. Ces membres appartiennent au monde scientifique ; chercheurs du CNRS et d'autres EPST, enseignants-chercheurs, ingénieurs... Structures de recherche et chercheurs sont examinés à intervalles réguliers (évaluation à 2 ans et à 4 ans pour les chercheurs CNRS) par une des 40 sections du comité national. D'autres structures d'évaluation sont aussi présentes au sein du CoNRS : la section 41 (gestion de la recherche) et 4 commissions interdisciplinaires en 2010 (contre 5 en 2006) chargées de recruter des chercheurs sur des profils scientifiques interdisciplinaires précis correspondants à la politique scientifique de l'organisme, en fonction de la qualité de leurs travaux et de l'originalité de leur recherche. Dans tous les cas, le choix du recrutement est guidé par l'excellence scientifique. Les CID en activité aujourd'hui sont : Sciences de la communication (42) ; Modélisation des systèmes biologiques, bioinformatique (43) ; Cognition, langage, traitement de l'information, systèmes naturels et artificiels (44) ; Dynamique des systèmes environnementaux, développement durable, santé et société (45)

Parmi les tâches des sections du COmité National de la Recherche Scientifique, l'élaboration d'un rapport sur la conjoncture scientifique est effectuée tous les quatre ans, généralement à mi-parcours. Il s'agit de dresser un état de l'art (rapport des sections et CID) et d'avoir une réflexion sur la diversité de pistes de recherche à venir (rapport de prospective des Conseils scientifiques de département devenus conseils scientifiques d'Instituts). Cette somme de connaissance de l'état

actuel de la science, issue de débats approfondis au sein de chaque section et commissions, est proposée en tant qu'outil de connaissance des avancées de la recherche sur toutes les disciplines et constitue un outil proposé pour la réflexion, la stratégie et l'action du CNRS et de l'ensemble de la recherche française. C'est ce travail qui est présenté ici et qui reflète les débats sur les résultats scientifiques et les orientations futures souhaitables. À ce dernier niveau, les propositions sont relayées par les rapports de prospectives élaborées par les Conseils scientifiques de département et présentés dans ce volume.

Les huit conseils scientifiques de département (MPPU, PU, PNPP, STII, Chimie, SDV, EDD et SHS) ont mené durant l'année 2009, un important travail de réflexion concernant les enjeux prospectifs. Tous insistent sur les idées de thèmes fédérateurs, d'interfaces et d'interdisciplinarité. Les CSD comme d'ailleurs les sections demandent un nécessaire accroissement de l'interdisciplinarité en construisant ensemble les problématiques autour d'objets partagés. Les enjeux scientifiques d'aujourd'hui sont connus mais toujours en évolution et interrogent sur ceux de demain. Nous être dotés des meilleurs outils pour répondre à l'avancée nécessaire du front du savoir indispensables aux enjeux sociétaux, en termes de bien être, de progrès social, de nouvelles technologies. La demande de connaissance concerne l'infiniment grand et l'infiniment petit, la lutte contre les maladies infectieuses ou de dégénérescence, les impacts de la pollution, le maintien de la biodiversité, les énergies nouvelles, la demande alimentaire, le vieillissement de la population et ses enjeux économiques et sociaux... La restructuration en 2010 des 9 départements en 10 instituts permettra-t-il d'augmenter la pratique de l'interdisciplinarité?

L'ensemble des travaux réunis ici, par la richesse des informations contenues, constitue un gisement d'idées pour l'établissement d'une politique scientifique par la gouvernance de l'organisme. Mais pas seulement. L'organisation du CNRS en établissement de recherche pluridisciplinaire lui donne la possibilité de dresser un panorama irremplaçable d'une très grande partie de l'activité scientifique exercée en France, en particulier celle concernant les aspects fondamentaux. Ce rapport est diffusé à l'étranger par le canal des collaborations internationales. Il constitue aussi un document utile pour continuer les échanges entre chercheurs appartenant à différents champs scientifiques pour favoriser la construction de la pratique interdisciplinaire. Il donne aussi des informations aux étudiants et doctorants voulant poursuivre une carrière professionnelle dans la recherche en indiquant des pistes de recherche potentielles. C'est enfin un document d'information à l'usage des politiques comme des citoyens intéressés par les enjeux majeurs qui existent autour de la recherche scientifique et de son développement. Bref, un outil de connaissance qui devrait être indispensable.

*Gilles BOËTSCH*

*Président du Conseil scientifique du CNRS*

RAPPORTS

DES 40 SECTIONS DU COMITÉ NATIONAL



# MATHÉMATIQUES ET INTERACTIONS DES MATHÉMATIQUES

*Président*

Yann BRENIER

*Membres de la section*

Rémy ABGRALL

Abdallah ASSI

Michel BOILEAU

Virginie BONNAILLIE-NOËL, secrétaire de section

Jean-Benoît BOST

Yannick BOURLES

Gilles CARRON

Gaëtan CHENEVIER

Bertrand DEROIN

François DIGNE

Christine DISDIER

Élisabeth GASSIAT

Alice GUIONNET

James LEDOUX

Christine LESCOPI

Frank LORAY

Lionel MOISAN

Jean-Marc SAC-ÉPÉE

Marie-France SAGOT

Nikolay TZVETKOV

La recherche en mathématiques est particulièrement active et réputée en France, mais souffre tout de même d'un certain manque de visibilité dans la société. Elle semble encore, pour la plupart des citoyens, une activité mystérieuse et insondable, sans grand impact, voire sans objet aux yeux des moins informés qui croient parfois la discipline figée depuis des siècles. Par ailleurs, même dans le milieu scientifique, les mathématiques peuvent être encore perçues avant tout comme une discipline de formation et de service, sans thématique propre de grande importance. Les crises financières et environnementales récentes ont pourtant révélé au grand public l'importance et l'omniprésence des mathématiques et plus particulièrement des modèles mathématiques. Nombre de mathématiciens ont pu voir, avec un mélange de fierté et d'inquiétude, l'importance de leur discipline révélée au grand public, alors que son utilisation était dénoncée à plusieurs reprises, souvent avec véhémence, par des personnalités de renom. Il faut sans doute remonter à l'époque de la guerre froide pour retrouver de telles mises en cause de l'utilisation des mathématiques et, plus particulièrement, de modèles mathématiques, qui sont en fait, dans bien des cas, conçus et développés en dehors du cadre strict de la recherche en mathématiques (laboratoires, banques, agences...). Cela donne une responsabilité éminente aux mathématiciens qui voient leur discipline jouer un rôle clé, de manière

évidente au côté des disciplines sœurs que constituent la physique et l'informatique, et de façon plus souterraine dans les autres. La création de l'INSMI au sein du CNRS est à cet égard un événement de grande importance : en interne, pour encourager les thématiques nouvelles et maintenir l'ensemble du spectre mathématique; en externe, pour développer les interactions avec les autres disciplines et soutenir les réponses aux demandes extérieures. La France peut se prévaloir d'une place de premier plan dans la recherche mondiale en mathématiques, dans presque tous les grands domaines, et il est essentiel de l'y maintenir.

## 1 – RAYONNEMENT DES MATHÉMATIQUES FRANÇAISES

Soulignons d'abord la vitalité et l'excellence des mathématiques françaises. Il suffit pour s'en persuader de regarder la place prise par l'école française au congrès international de mathématiques à Hyderabad en août 2010, un événement qui a lieu tous les quatre ans et qui voit la remise des médailles Fields. L'école française y a été reconnue tout particulièrement par l'obtention de deux des quatre médailles, celles de Cédric Villani (directeur de l'IHP et professeur à Lyon) et Ngô Bao Châu (franco-vietnamien, professeur à Orsay, détaché aux USA), ainsi que par la remise du prix Gauss à Yves Meyer. La présence de l'école française (chercheurs en poste en France ou de formation récente en France) est considérable. On compte 4 conférenciers pléniériers sur 20 (dont 2 CNRS, dans les domaines de théorie du contrôle, arithmétique, géométrie algébrique et systèmes dynamiques), et sur les 20 sections disciplinaires, 13 comptaient au moins un conférencier français : algèbre (1), théorie des nombres (2), géométrie algébrique (2), géométrie (3), topologie (1, en poste à l'étranger), groupes et algèbres de Lie (1), analyse fonctionnelle (1), systèmes dyna-

miques (4), équations aux dérivées partielles (3), physique mathématique (4), probabilités et statistiques (1), contrôle (1), sciences mathématiques et technologie (1). Dans le même ordre d'idée, le prix Abel (créé à l'image des prix Nobel et remis pour la première fois en 2003 à un mathématicien français, Jean-Pierre Serre) a été remis depuis à Jacques Tits (mathématicien belge ayant exercé au Collège de France) en 2008 pour ses travaux dans la formation de la théorie moderne des groupes, et à Mikhaïl Gromov (mathématicien russe exerçant à l'IHES et à NYU) en 2009 pour ses contributions révolutionnaires à la géométrie.

## 2 – EXEMPLES DE PROGRES RECENTS EN MATHÉMATIQUES

Les exemples qui suivent ne sont destinés qu'à illustrer la diversité et la richesse des découvertes récentes en mathématiques. Il n'est en aucun cas question de faire une description exhaustive et détaillée de l'ensemble de l'activité, même de plus haut niveau. Des pans entiers des mathématiques en sont absents. La classification adoptée est aussi très partielle et largement arbitraire, notamment compte tenu de la forte imbrication des différents domaines. Les exemples sont souvent reliés, de près ou de loin, à des questions posées dans d'autres sciences, ce qui souligne le caractère naturellement interactif des mathématiques.

### 2.1 THÉORIE DES NOMBRES ET SYSTÈMES DYNAMIQUES

Le programme de Langlands tente de mettre à jour des connexions mystérieuses entre la théorie des nombres et la théorie des

représentations de groupes (dont un cas particulier implique le grand théorème de Fermat). Ses aspects géométriques sont aussi centraux en géométrie algébrique ; cette « dualité » est en rapport avec d'autres dualités provenant de la théorie quantique des champs et la théorie des cordes en physique. La recherche est toujours extrêmement active dans ce domaine et l'école française y contribue au tout premier plan. Mentionnons par exemple la démonstration récente par G. Laumon, B.C. Ngo et J.-L. Waldspurger du « lemme fondamental », fameux obstacle soulevé par Langlands il y a plus de vingt ans et dont les retombées sont immenses, ainsi que la démonstration de la conjecture de Sato-Tate. Un autre axe majeur émerge actuellement, qui complète le programme initial de Langlands, avec le développement d'un avatar  $p$ -adique (imaginé par C. Breuil et dont l'inspiration et la nécessité remontent aux travaux de Wiles sur le grand théorème de Fermat) suggérant un tissu de conjectures à découvrir mêlant l'analyse  $p$ -adique au programme de J.-M. Fontaine. La démonstration récente par P. Colmez du cas de la dimension deux constitue une avancée fondamentale sur ces questions et ouvre de nombreuses voies. On voit enfin se tisser de nouveaux liens entre différents problèmes, par exemple entre la version géométrique de la correspondance de Langlands et la résolution, à l'aide de cohomologie quantique, de vieux problèmes de géométrie énumérative. Cette résolution en a d'ailleurs inspiré une autre, de nature combinatoire, grâce à l'émergence de la géométrie tropicale. Il convient de remarquer au passage qu'à travers de telles interactions profondes avec d'autres disciplines extrêmement avancées, la combinatoire montre une maturité nouvelle.

La combinatoire additive se trouve en interaction avec la théorie ergodique, la théorie des nombres et l'analyse harmonique. Les méthodes combinées de ces différents sujets ont permis de s'attaquer à des problèmes anciens sur la structure de l'ensemble des nombres premiers ; le résultat le plus spectaculaire étant qu'il contient des suites arithmétiques de longueur arbitrairement longue (Green-Tao 2006). La démonstration repose sur une philo-

sophie déjà présente en théorie ergodique qui consiste à montrer qu'un sous-ensemble d'un ensemble structuré est lui-même structuré en dehors d'une partie négligeable, et utilise des méthodes de nature « non commutatives ». Le domaine a soulevé un nombre important de problèmes d'intérêt indépendant, avec entre autres, de nouvelles connexions avec la théorie géométrique des groupes ou les EDP.

Enfin, on peut souligner à quel point la géométrie  $p$ -adique introduite par Berkovich au début des années 90 s'est imposée ces dernières années pour ses diverses applications en géométrie complexe, arithmétique, équations différentielles et systèmes dynamiques.

## 2.2 GÉOMÉTRIE ET TOPOLOGIE

La résolution de la conjecture de Poincaré (les variétés fermées simplement connexes de dimension 3 sont toutes homéomorphes à la sphère) par Gregory Perelman il y a quelques années (via la démonstration de la conjecture de géométrisation de W. Thurston) a été l'aboutissement d'un siècle de topologie géométrique et l'un des événements le plus spectaculaire des dernières années, en mathématiques.

Renouvelant un programme lancé par R. Hamilton sur l'étude du flot de Ricci, elles reposent sur des méthodes variationnelles (liées aux équations aux dérivées partielles issues de la géométrie riemannienne), et sont pour le moment totalement disjointes des grands courants précédents en topologie de dimension 3 (homologie de Floer, invariants quantiques). Étant donné l'importance et les retombées de ces courants ces quinze dernières années, il n'est même pas la peine d'insister sur le caractère extrêmement prometteur d'une assimilation des méthodes de Hamilton-Perelman. La médaille Fields ainsi que le premier prix Clay du millenium a été attribué à G. Perelman. Des équipes françaises se sont distinguées dans la vérification des travaux de G. Perelman et, de même, la remise officielle du prix Clay a été programmée en juin 2010 en France, à l'Institut Henri Poincaré.

En ce qui concerne la géométrie symplectique et la topologie en basse dimension, les théories d'homologie à la Floer continuent de se développer et à apporter des réponses spectaculaires à de nombreux problèmes ouverts, notamment celle de Heegaard-Floer qui permet de détecter le genre des nœuds et leur éventuelle nature fibrée, ainsi que l'homologie de Khovanov. Après les résultats impressionnants de Perelman, il est important de continuer à progresser dans la compréhension des liens entre la géométrie, les théories quantiques des champs topologiques et les théories d'homologie de Floer ou Khovanov, notamment par l'étude de la conjecture qui exprime le volume d'une variété hyperbolique de dimension 3 comme limite d'invariants quantiques.

Après le succès des travaux de Perelman utilisant le flot de Ricci pour démontrer la géométrisation des variétés de dimension 3, on s'attend à ce que l'étude du flot de Kähler-Ricci permette des avancées importantes en géométrie complexe (notamment vers le programme de Mori). Toujours en géométrie complexe et géométrie algébrique complexe, les programmes de Donaldson, Tian visant à établir un critère algébrique de positivité pour déterminer les classes de Kähler possédant une métrique extrémale ou à courbure scalaire constante ont connu des développements importants avec par exemple la résolution par Donaldson du cas des surfaces toriques.

Enfin, le concept de courbure de Ricci a été considérablement renouvelé et généralisé à des espaces métriques très généraux, par des méthodes d'inégalités fonctionnelles, liées à la théorie des probabilités et du transport optimal.

## 2.3 ÉQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES ET ANALYSE NUMÉRIQUE

Les équations aux dérivées partielles, le plus souvent non-linéaires, sont omniprésentes en physique mathématique et en géométrie

différentielle et font l'objet de très nombreuses recherches, et l'école française est particulièrement active dans ce domaine.

Ainsi, pour les edp de la théorie cinétique des gaz, après les avancées considérables obtenues par Golse et Saint-Raymond sur la dérivation rigoureuse des équations de Navier-Stokes, celles de Desvillettes et Villani concernant le retour vers l'équilibre des solutions de l'équation de Boltzmann, le travail récent de Mouhot et Villani établit la première justification mathématique de l'amortissement Landau des solutions des équations de Vlasov. Le domaine voisin des équations de la mécanique des fluides constitue toujours un domaine de prédilection pour les analystes des edp non-linéaires. L'étude des phénomènes d'oscillation y a connu des progrès spectaculaires par l'utilisation de la méthode d'intégration convexe de Gromov qui a permis de comprendre plus profondément les limites du concept de solutions faibles notamment pour les équations d'Euler. Dans un ordre d'idée voisin, de nouvelles techniques de régularité par compensation ont vu jour pour les systèmes de lois de conservation présentant certaines anti-symétries.

Du côté des edp géométriques, les avancées récentes sur l'existence des « wave maps » (équivalent lorentzien des applications harmoniques) ont fait interagir d'une manière spectaculaire les idées de « compacité-concentration » développées par Pierre-Louis Lions dans les années 80 et les idées d'analyse harmonique appliquées aux EDP non linéaires, introduites par Jean Bourgain au début des années 90. Ces interactions ont eu d'autres applications et vont sans doute animer de futures recherches dans l'analyse des EDP non linéaires. Les équations de la relativité générale constituent par ailleurs un domaine toujours très actif et, dans la foulée des résultats fondamentaux de Christodoulou-Klainerman sur la stabilité de l'espace de Minkowski, c'est la stabilité des espaces de Kerr (liés à la modélisation des trous noirs) qui est dorénavant à l'ordre du jour. Enfin, l'analyse de régularité des solutions des équations du transport optimal (généralisation des équations de Monge-Ampère réelles) ont révélé des liens surprenants avec la géométrie riemannienne et les variétés à courbure sectionnelle positive.

La théorie des équations aux dérivées partielles interagit dorénavant ouvertement avec la théorie des probabilités, notamment par le développement de l'étude des edp avec coefficients ou seconds membres stochastiques, par l'utilisation d'arguments de mécanique statistique pour l'étude de la régularité «générique» de certaines équations et, de façon frappante, par l'analyse de l'algorithme de Métropolis par l'analyse semi-classique. La théorie des jeux à champ moyen, développé par Lasry et Lions, a de fortes implications pratiques, notamment en économie, et, d'un point de vue conceptuel, unifie des points de vue précédemment séparés (contrôle stochastique, grands systèmes de particules, transport optimal, etc.).

À la fin des années 80, DiPerna et Lions ont complètement renouvelé la théorie des équations différentielles ordinaires à coefficients peu réguliers par une approche relevant, paradoxalement, de la théorie des équations aux dérivées partielles. Ce domaine a connu dans les dernières années d'importants développements, incluant les équations différentielles stochastiques. Le cas des coefficients à variation bornée est maintenant bien compris mais de nouveaux résultats autorisant une simple régularité fractionnaire viennent d'être établis pour les équations du second ordre, ce qui constitue une percée remarquable.

Enfin, l'analyse des équations aux dérivées partielles issues de la modélisation en biologie est en plein essor, à l'interface des équations cinétiques, paraboliques, avec de nombreuses questions qualitatives liées à la théorie des systèmes dynamiques.

Dans le domaine de l'analyse numérique, on note l'explosion des méthodes multi-échelles (avec notamment les schémas conservant l'asymptotique, les algorithmes rapides de calcul d'opérateurs intégraux de Fourier, les méthodes de rayons gaussiens, parmi bien d'autres). Une intéressante interaction avec l'analyse stochastique est l'utilisation du chaos de Wiener pour l'étude paramétrique des modèles numériques, en relation avec la théorie de l'homogénéisation. Bien entendu, au delà de l'analyse numérique, le calcul scientifique

constitue une interface de première importance des mathématiques avec les autres sciences.

## 2.4 PROBABILITÉS ET STATISTIQUES

L'étude des matrices aléatoires en relation avec les «probabilités non-commutatives», reste un domaine particulièrement actif de la théorie des probabilités. Ainsi la preuve de l'universalité des espacements des valeurs propres (loi asymptotique indépendante des détails de la matrice) par Tap-Vu et Erdős-Schlein-Yau est un résultat longuement attendu, qui justifie l'approximation des niveaux d'énergie comme valeurs propres de grandes matrices aléatoires. On peut noter que les grandes matrices aléatoires sont aussi très utiles en statistiques (modélisation de grands tableaux de données aléatoires) et en télécommunication (filtrage linéaire, données de grande dimension). À ce sujet, les inégalités de concentration sont toujours très largement développées dans le cadre de l'apprentissage statistique. De façon générale, l'analyse des milieux aléatoires de toute sorte a beaucoup progressé (notamment les cartes, arbres, graphes, polymères etc. aléatoires). La démonstration par Talagrand de la formule des répliques de Talagrand est un bon exemple de la place éminente occupée par les probabilités à l'interface des mathématiques avec la physique mathématique et la physique théorique. Un autre exemple est fourni par les travaux de Simonov (médaille Fields 2010) dans le domaine de la percolation, des modèles à invariance conforme, dans la lignée de Schramm. De même, l'imbrication des probabilités avec la combinatoire, l'algorithmique et l'informatique théorique est de plus en plus manifeste. L'interaction avec les sciences du vivant est en plein essor, avec notamment la modélisation probabiliste de l'évolution des espèces par des processus stochastiques. Enfin, il est inutile d'insister sur le rôle proéminent des probabilités dans la modélisation des marchés financiers.

### 3 – INTERACTIONS ET APPLICATIONS DES MATHÉMATIQUES

La présence des autres sciences en mathématiques est généralisée. C'est évidemment le cas de la physique non-linéaire et de la physique statistique, très fréquemment impliquées dans les recherches en probabilité et équations aux dérivées partielles, lesquelles sont traditionnellement et naturellement tournées vers les applications des mathématiques. La théorie des champs, classiques et quantiques, la théorie des cordes, ont inspiré nombre de percées conceptuelles au cœur même des mathématiques habituellement considérées comme les plus « pures ». Inversement, la théorie des nombres est à l'origine de l'essentiel des méthodes cryptographiques modernes, alors que l'analyse harmonique a permis le développement des techniques de transformation en ondelettes et de compression d'images. L'ingénierie est traditionnellement, et particulièrement en France, liée à l'analyse numérique et aux équations aux dérivées partielles, au travers du calcul scientifique et de la modélisation. Malgré une certaine désindustrialisation du territoire national, les mathématiciens restent très présents dans les secteurs de haute technologie, notamment dans les domaines du traitement d'image et de la simulation numérique. Plus récemment, on note un véritable emballement en direction des sciences du vivant, pas seulement en probabilités, statistiques et équations aux dérivées partielles, comme on pouvait s'y attendre, mais aussi au travers de l'implication en profondeur de mathématiciens habituellement classés comme « purs ». Bien entendu, les sciences sociales et économiques ne sont pas en reste, et l'imbrication avec les mathématiques est manifeste, en particulier en France, où sont formés nombre d'analystes du risque et des marchés financiers.

### 4 – STRUCTURATION DES MATHÉMATIQUES

Les mathématiques françaises restent essentiellement universitaires (environ 3 000 enseignants-chercheurs pour 350 chercheurs CNRS). De nombreux organismes (INRIA, INRA, CEA, etc.) accueillent aussi des mathématiciens, le plus souvent aux interfaces mais pas toujours. Soulignons qu'il y a peu de laboratoires du CNRS relevant de la section 01 associés à des écoles d'ingénieurs, ou avec d'autres EPST. Cela est sans doute en partie dû à l'influence trop limitée du CNRS au travers de la section 01 dans le domaine de la modélisation et du calcul scientifique, notamment par rapport à l'INRIA qui a dorénavant une implantation forte en milieu universitaire, essentiellement dans le domaine des mathématiques appliquées. Les recrutements dans ces domaines restent relativement faibles (il est vrai que la concurrence des autres EPST (CEA, INRIA), comme d'autres sections du CNRS, est importante). Les mathématiciens ont pourtant un rôle moteur à jouer, au vu des enjeux scientifiques et techniques.

Malgré l'absence de laboratoires propres, avec une soixantaine d'UMR, bien réparties sur la carte universitaire française et dans les limites des moyens humains et financiers engagés, le CNRS et l'INSMI jouent un rôle essentiel de structuration nationale des mathématiques françaises. Avec une vision d'ensemble de l'activité nationale, ils participent au suivi et à l'évaluation des laboratoires mixtes, dans un souci permanent de concertation avec les universités. La mobilité de et vers l'enseignement supérieur, souvent citée comme exemplaire, est largement la conséquence de la structuration nationale effectuée par le CNRS avec les UMR. Dans le même ordre d'idée, on ne saurait trop rappeler l'importance des GDR, qui permettent de fédérer les chercheurs à l'échelle nationale ou internationale (GDRE) et favorisent l'insertion des jeunes chercheurs. Leur rôle structurant est particulièrement efficace, notamment par rapport aux contrats de recherche de l'ANR.

# 02

---

## THÉORIES PHYSIQUES : MÉTHODES, MODÈLES ET APPLICATIONS

*Présidente de la section*

Claire LHULLIER

*Membres de la section*

Olivier BABELON

Constantin BACHAS

Véronique BERNARD

Élizabeth BERNARDO

Thierry DAUXOIS

Sacha DAVIDSON

Cédric DEFFAYET

Dominique DELANDE

Sébastien DESCOTES-GÉNON

Nicolas DESTAINVILLE

Ulrich ELLWANGER

Vincent HAKIM

Malte HENKEL

Véronique JONNERY

Jean-Loïc KNEUR

Thierry MARTIN

Alberto ROSSO

Christian TAGGIASCO

Emmanuel TRIZAC

Pierre VANHOVE

Comme le disait Niels Bohr « Prediction is very difficult, especially about the future ». Ainsi notre PDG, Mr. Fuchs, s'interrogeait sur l'utilité du rapport de conjoncture en 2006, alors qu'il était président de la section 13 du CoNRS. Il constatait que ces rapports sont systématiquement passés à côté de toutes les révolutions scientifiques...

La physique théorique a pour but l'élaboration d'un cadre conceptuel et mathématique qui vise à décrire de façon unifiée la vaste diversité des phénomènes naturels observés. Cela veut dire bien sur la recherche des lois fondamentales du monde physique, mais aussi le développement de méthodes générales permettant d'analyser et comprendre les phénomènes physiques dans toute leur complexité.

La section 02 « Théories physiques, méthodes, modèles et applications » ou plus simplement Physique Théorique regroupe des chercheurs représentant des domaines très variés de la physique, chacun enrichissant et bénéficiant à son tour des avancées venant d'autres thématiques. C'est cet échange permanent entre disciplines qui caractérise et justifie la section 02.

Initialement organisée autour de la physique des particules élémentaires, tous les aspects de la recherche fondamentale en physique sont maintenant représentés en section 02 ainsi qu'un certain nombre d'interfaces avec

l'astrophysique, la biologie, les mathématiques, l'informatique... Si cette évolution de la physique théorique est générale dans le monde, elle est particulièrement marquée au CNRS et il convient de s'en féliciter.

La section 02 ne représente cependant pas l'ensemble de la physique théorique au CNRS. Des théoriciens sont aussi présents en particulier en section 03, 04, 05, 06, 11 et 17, dans des laboratoires avec une forte composante expérimentale. Inversement, des expérimentateurs en physique non linéaire et en mécanique statistique, proches de la modélisation, font partie de la section 02. Ainsi le lien théorie-expérience demeure solide et constitue une richesse de la communauté française de physique théorique. Les fortes interactions de la physique théorique avec les mathématiques sont aussi importantes.

On peut regrouper les thématiques couvertes par la section 02 schématiquement en cinq grands domaines :

- physique des interactions fondamentales et cosmologie : structures et dynamique nucléaires, structure des hadrons, plasma de quark et gluons, physique des saveurs, extensions du modèle standard, cosmologie, astroparticules, théories de la gravitation et ondes gravitationnelles ;

- physique mathématique : théorie des cordes, théorie quantique des champs, théories conformes et systèmes intégrables, systèmes dynamiques et équations aux dérivées partielles, mécanique statistique rigoureuse à l'équilibre ou hors équilibre, processus stochastiques et géométrie aléatoire, chaos, matrices aléatoires ;

- mécanique statistique et physique non linéaire : systèmes hors équilibre, milieux granulaires et matière molle, systèmes désordonnés et thèmes aux interfaces processus stochastiques, invariance conforme, physique non-linéaire, hydrodynamique, turbulence, physique des plasmas, un renouveau de la mécanique des solides et de la science des matériaux ;

- matière condensée : systèmes unidimensionnels, effet Hall quantique fractionnaire, matériaux à forte corrélations quantiques,

liquides de spins, q-bits quantiques, physique mésoscopique, information quantique, gaz atomiques ultra froids ;

- physique et biologie : traitement des données et développement de nouveaux algorithmes, interactions moléculaires, physique de la cellule, assemblées cellulaires, mouvements collectifs et morphogénèse, réseaux, physique statistique et sciences humaines, neurosciences computationnelles.

## **1 – PHYSIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES ET COSMOLOGIE**

Les Modèles Standards en physique des particules et cosmologie sont en accord avec un grand nombre d'observations. Il reste cependant des questions ouvertes, même dans le cadre de la physique des particules : dans le secteur des interactions fortes (QCD), la théorie manque de prédictions précises (ou analytiquement contrôlables) dans le domaine non-perturbatif du couplage fort ; dans le secteur électrofaible, le mécanisme de Higgs, sous-jacent à la brisure spontanée de la symétrie électro-faible, reste encore à confirmer à l'heure de actuelle.

De plus, ces modèles ne décrivent ni l'origine de la matière et énergie sombre, ni l'asymétrie baryonique de l'univers, ni les masses et mélanges observés pour les neutrinos. Enfin, ces théories soulèvent des questions plus profondes, telles que l'origine et les propriétés des trois familles de quarks et leptons et la violation de CP ; l'origine des symétries de jauge ; l'origine et propriétés du boson de Higgs ; l'origine du Big Bang et de l'inflation en cosmologie ; ainsi que la quantification de la gravitation.

Dans certaines théories «au-delà du Modèle Standard», on tente de répondre à

une partie de ces questions (en profitant d'échanges d'idées avec la physique mathématique et physique statistique). On espère également que les expériences (en cours ou à venir) en physique des (astro-)particules et en astronomie donneront des indices cruciaux sur la nature de telles théories.

## 1.1 STRUCTURE ET DYNAMIQUE NUCLÉAIRES

Les hadrons forment les noyaux atomiques selon des structures complexes. Ces dernières années de nombreuses expériences ont fait apparaître des phénomènes inattendus, déplacement ou disparition des nombres magiques, inversion de parité, halos et peaux de neutrons, brisures spontanées de nouvelles symétries, nouveaux types de radioactivité, qui remettent en cause beaucoup des concepts traditionnels de la structure des noyaux. La compréhension des noyaux exotiques, noyaux loin de la stabilité, riches en protons ou en neutrons, permet de fournir des prédictions quantitatives pour les réactions intervenant dans les processus de nucléosynthèse. Un domaine à l'interface entre la structure nucléaire et l'astrophysique observationnelle connaît un développement important depuis quelques années : les modélisations des objets stellaires compacts, qui font appel aux théories nucléaires. Des travaux sur l'équation d'état de la matière nucléaire et de la matière de neutrons ont ainsi mis en évidence des propriétés superfluides des objets stellaires. L'ensemble de ces domaines a vu l'émergence ces dernières années de calculs ab-initio.

Les physiciens nucléaires français se sont beaucoup investis dans le développement de techniques microscopiques afin de décrire les propriétés des noyaux. Avec les données obtenues avec les faisceaux radioactifs SPIRAL et prochainement SPIRAL2 à GANIL, ces méthodes sont étendues pour mieux décrire les états et systèmes exotiques. Un grand effort est mis également dans le développement d'une théorie de type fonctionnelle de la densité d'éner-

gie. D'autre part comprendre les noyaux nécessitent d'avoir une très bonne connaissance de l'interaction nucléaire. Un des objectifs est de déterminer des paramétrisations de l'interaction effective capable de décrire aussi bien les propriétés globales des noyaux que les différents types de corrélation dont ils sont le siège. De plus, l'interaction nucléon-nucléon est maintenant obtenue à partir de QCD en utilisant une théorie effective chirale. Sa dépendance d'échelle nécessite l'utilisation des méthodes du groupe de renormalisation pour construire un potentiel dit mou à deux ou trois nucléons.

## 1.2 STRUCTURE DES HADRONS

À basse énergie, dans le régime non-perturbatif, il semble impossible de résoudre la QCD analytiquement. Toutefois on peut exploiter ses symétries et construire une théorie effective équivalente à QCD dans ce domaine d'énergie, la théorie chirale des perturbations dont les degrés de liberté ne sont plus les quarks et les gluons mais les pions, les kaons et les nucléons. Une autre façon de procéder est de discrétiser l'espace-temps pour résoudre numériquement QCD sur réseau. Des machines de plus en plus puissantes, de meilleurs algorithmes et des types d'action nouveaux ont donné lieu à de récents progrès : les masses des quarks légers sont à présent proches des valeurs physiques (en particulier pour le quark étrange), les effets de volume et de maille finis sont mieux maîtrisés, tandis que les simulations incluent à présent des quarks de la mer (se libérant de l'approximation « quenched »). La précision des déterminations de quantités hadroniques en QCD sur réseau va devenir dans les prochaines années une question cruciale pour des tests précis du Modèle Standard par le biais des transitions hadroniques (voir Physique des saveurs plus loin). La communauté française en QCD sur réseau est impliquée activement dans plusieurs collaborations à l'échelle européenne pour mettre en commun puissance de calcul, confi-

gurations de jauge et outils d'analyse, mais aussi pour concevoir en partenariat avec des ingénieurs et des informaticiens les machines et les logiciels les mieux adaptés pour résoudre ces problèmes.

Un certain nombre de propriétés des mésons et des baryons a ainsi été obtenu par ces méthodes et les calculs sont actuellement étendus au cas des résonances, principalement motivés par les programmes expérimentaux à JLAB, ELSA, COSY et MAMI. Expérimentalement on utilise des sondes hadroniques et leptoniques et la mesure des réactions exclusives (réactions où l'état final hadronique est détecté) est maintenant possible. On peut ainsi avoir des informations sur les diverses contributions au spin du proton. Parmi les autres quantités intéressantes se trouvent les distributions de partons (quarks et gluons) généralisés qui permettent de comprendre l'ensemble des caractéristiques non-perturbatives du nucléon et certains de ses processus exclusifs.

La physique hadronique s'intéresse également à la spectroscopie de l'interaction forte : pourquoi la plupart des hadrons apparaissent soit comme des états à trois quarks (baryons) soit comme des états à un quark et un anti-quark (mésons). Des expériences récentes dans les usines à B ont remis en question cette image simple en mettant en évidence une spectroscopie d'états exotiques, et une importante activité théorique a été déployée sur ce sujet (QCD sur réseau, théories effectives). L'expérience PANDA auprès du nouvel accélérateur FAIR dont le fonctionnement est prévu pour 2012, cherchera de nouvelles formes de matière, particules uniquement formées de gluons ou encore particules hybrides formées de quarks et de gluons.

Enfin, un dernier pan de l'activité théorique concernant l'interaction forte est l'étude de QCD à haute énergie. En effet, cette discipline jouera un rôle très importante dans la compréhension des collisions hadroniques à très haute énergie du LHC, où le bruit de fond lié à l'interaction forte doit être analysé de façon précise pour isoler les collisions pertinentes où de nouvelles particules sont produites. Cela nécessite et suscite d'importants

progrès sur le plan théorique : identification des processus en jeu, utilisation et limites des approches de factorisation, calculs perturbatifs à ordre élevé, formalisme des amplitudes d'hélicité, resommation de la théorie de perturbations dans des configurations cinématiques donnant de larges contributions... En parallèle, des questions plus phénoménologiques, importantes pour le LHC, sont actuellement en plein essor, dans le domaine des simulations Monte-Carlo et des algorithmes de jets.

### 1.3 PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS

Les collisions d'ions lourds sont utilisées afin de porter, de façon transitoire, la matière aux hautes densités d'énergie nécessaires pour permettre la formation d'une matière de quarks et de gluons, différente de la matière hadronique usuelle. On s'attend à observer à un certain stade un plasma de quarks et de gluons, similaire à celui rencontré aux premiers instants de l'Univers. Un résultat étonnant a ainsi été obtenu à RHIC, en effet cette matière se comporte plus comme un liquide que comme un gaz. Les énergies plus élevées mises en jeu au LHC avec l'expérience ALICE permettront d'étendre le domaine d'étude à des densités d'énergie extrêmes. Lorsque l'énergie diminue une transition de phase vers la matière hadronique se produit. Plusieurs équipes françaises sont impliquées dans l'étude de ces questions, tant au niveau expérimental que théorique.

Les sujets d'étude dans ce domaine sont en effet nombreux : thermalisation de la distribution initiale de la matière pour former le plasma, rôle des instabilités, caractérisation du plasma et de ses propriétés thermodynamiques, nature de la transition de phase de déconfinement et de restauration de la symétrie chirale, diagramme de phase. Pour étudier un problème d'une telle complexité, les méthodes mises en jeu sont multiples et font appel à différents domaines de la physique et à des approches analytiques aussi bien que numériques : théorie des champs à tempéra-

ture et densité finie, théorie des cordes et correspondance AdS/CFT (pour étudier le régime de couplage fort), calculs sur réseau *ab initio*, théorie cinétique, hydrodynamique visqueuse.

## 1.4 PHYSIQUE DES SAVEURS

La physique des saveurs cherche à comprendre l'origine des interactions qui différencient les six types (ou saveurs) de fermions (quarks et leptons), et d'étudier leur phénoménologie. Dans le cadre du Modèle Standard, ces différences proviennent des interactions des fermions avec le boson de Higgs. Elles sont donc liées (a) à la hiérarchie des masses des fermions, (b) à la brisure de la symétrie électrofaible, qui détermine les propriétés de l'interaction faible et (c) aux propriétés de l'interaction forte dans le cas des quarks.

L'information sur les transitions faibles chargées peut être encodée dans deux matrices de mélange, l'une pour les quarks (de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa), l'autre pour les leptons (de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata). Un effort théorique et expérimental remarquable a permis de confirmer récemment que la matrice de mélange des quarks, de structure nettement hiérarchique, décrivait précisément les transitions entre les différentes saveurs (en particulier grâce aux expériences Babar et Belle). Le phénomène d'oscillations a prouvé que les neutrinos sont massifs (un premier signe de physique au-delà du Modèle Standard), deux des angles de la matrice de mélange des leptons se sont avérés proches de  $1$  ( $\pi/4$  et  $\pi/6$ ), tandis que le troisième est nettement plus petit (en-dessous de  $0,1$ ).

Les activités théoriques du domaine seront fortement liées aux résultats expérimentaux attendus dans les prochaines années. La précision des observations sera en particulier améliorée grâce à deux expériences du CERN (LHCb et NA62), le démarrage de l'expérience BESIII à Beijing, et la mise en place des expériences Belle-II et SuperB. Ces expériences ont pour objectif d'étudier des processus très

sensibles à une nouvelle physique au-delà du MS (désintégrations rares du K et du B, dynamique du charme) ou de tester la matrice de mélange des quarks dans des secteurs nouveaux (mélange et désintégrations du méson Bs, dynamique du méson Bc).

L'expérience MEG mesure des transitions violant la saveur dans le secteur des leptons chargés, qui constitueraient une preuve incontournable de nouvelle physique. Plusieurs expériences (dont double Chooz sur réacteur, et T2K sur faisceaux) vont déterminer les paramètres manquants de la matrice de mélange des leptons, tandis que des détecteurs aux sensibilités accrues (dont SuperNEMO) étudieront les désintégrations double beta sans neutrino, afin de mettre en évidence un éventuel caractère de Majorana des neutrinos, les singularisant comme les seuls fermions constituant leur propre antiparticule et fournissant une explication à leur masse très faible.

Cette activité expérimentale fournira naturellement plusieurs axes de recherche. Les mesures de précision sur les transitions dans le secteur des quarks, soumis à l'interaction forte, nécessiteront un contrôle rigoureux des incertitudes hadroniques, obtenu grâce aux progrès des simulations de QCD sur réseau (voir ci-dessus) et des théories effectives.

Deuxièmement, dans le Modèle Standard à trois générations de fermions, c'est l'interaction faible qui contient les sources de violation de CP (asymétrie entre particule et antiparticule) apparaissant comme des phases dans les matrices de mélange. Les mesures de la phase apparaissant dans la matrice de mélange des quarks montrent que la violation de CP dans ce secteur est insuffisante pour expliquer la prépondérance de la matière sur l'antimatière observée dans l'Univers actuel. Le secteur leptonique pourrait produire naturellement un tel excès cosmologique à l'aide des phases de la matrice de mélange des leptons avec une extension minimale du Modèle Standard (via un mécanisme « de balançoire »), qui est donc l'objet d'une intense activité théorique.

Troisièmement, les transitions neutres d'une saveur à une autre sont petites dans le

Modèle Standard, et possèdent donc une sensibilité quantique à de nouvelles particules virtuelles de masse de l'ordre du TeV et au-delà. Elles placent ainsi des contraintes très fortes sur l'échelle de la nouvelle physique et/ou l'espace des paramètres acceptable pour des extensions du Modèle Standard. La mise en relation des contraintes issues de la physique des saveurs et des observations des expériences à grand-pT du LHC et de Fermilab constituera certainement une activité importante des théoriciens français du domaine dans les prochaines années.

## 1.5 EXTENSIONS DU MODÈLE STANDARD

La mise en opération du LHC marque le début d'une ère sans précédent pour la physique des particules, avec la perspective d'explorer en détail l'échelle d'énergie du TeV pertinente pour la brisure de la symétrie électrofaible, et de révéler non seulement l'origine de cette brisure mais toute une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

La première tâche des expériences auprès des grands accélérateurs comme le Tevatron et le LHC est sans doute la confirmation et la vérification du secteur de Higgs : la mesure de la masse et des couplages du boson de Higgs et éventuellement la découverte d'un nombre plus élevé de tels bosons donneraient des informations précieuses sur des extensions plausibles du Modèle Standard, typiquement reliées au secteur de Higgs. Pour cela une bonne compréhension des différents signaux du boson de Higgs et de ses propriétés est nécessaire. Ces études sont effectuées par les phénoménologues dans plusieurs laboratoires en France, souvent en collaboration étroite avec des expérimentateurs.

Les théories « au-delà du Modèle Standard » les plus étudiées sont : la supersymétrie ; les théories à dimensions spatiales supplémentaires ; les théories de nouvelles interactions fortes à une échelle de l'ordre du TeV. Dans

tous ces scénarios de nouvelles particules (outre le boson de Higgs) sont prédites, mais ces prédictions ne sont pas uniques. Les masses, mais aussi les nombres quantiques de ces nouvelles particules, dépendent largement des détails des modèles. Ces particules devraient éventuellement être produites auprès des grands accélérateurs : des « sparticules » (super-partenaires des quarks, des leptons et des bosons de jauge) en supersymétrie, des états de Kaluza-Klein pour les modèles à dimensions supplémentaires, ou encore de nouveaux états liés dans le cas de nouvelles interactions fortes. Ces deux derniers scénarios peuvent aussi mener à des modèles sans boson de Higgs.

Une question importante concernant les modèles supersymétriques est de préciser le mécanisme précis encore assez mystérieux à l'origine de la nécessaire brisure de la supersymétrie. Cette brisure pourrait être reliée à la (super)gravité ; ou à des interactions de jauge, ou encore à des mécanismes plus complexes dans le cadre de dimensions supplémentaires. Ces questions sont étudiées activement par plusieurs équipes françaises, qui abordent également des aspects plus formels « au-delà du Modèle Standard » : en effet la supersymétrie et les dimensions supplémentaires sont en partie motivées par les théories des supercordes, et une activité importante concerne la construction de modèles réalistes dans ce cadre, avec compactification des dimensions supplémentaires, par exemple avec des « flux » de champs tensoriels et/ou de D-branes, en essayant de réaliser la brisure spontanée de la supersymétrie, et si possible une constante cosmologique suffisamment petite.

Au LHC on espère pouvoir vérifier (ou infirmer) une large gamme de modèles, mais un nouvel accélérateur  $e^+e^-$  (ILC, International Linear Collider) sera sans doute nécessaire pour clarifier la situation. D'autre part la détection directe de nouvelles particules n'est pas le seul moyen de validation de théories « au-delà du Modèle Standard » : il est également nécessaire de tester les prédictions d'une telle théorie pour des observables telles que les désintégrations rares (de leptons et de quarks lourds), mesurées avec une précision élevée

dans certaines expériences actuelles ou à venir. De plus, ces théories donnent des prédictions sur les propriétés de la matière sombre. Ainsi de nombreuses études phénoménologiques sont essentielles pour rendre possible l'interprétation de données par les modèles. Notamment la prédiction précise de nouveaux processus dans le cadre de ces différents modèles nécessite le développement d'outils analytiques et numériques sophistiqués, et adaptés à l'environnement d'un collisionneur tel que le LHC, ou bien également pour prédire les observables pertinentes à la problématique de la matière sombre, et la communauté française joue un rôle très actif dans tous les domaines de ces analyses, avec une interaction étroite entre expérimentateurs et théoriciens.

## 1.6 COSMOLOGIE

Depuis plusieurs années la cosmologie vit une révolution tant sur le plan théorique qu'observationnel. En effet, l'observation des fluctuations de température du Fond Diffus Cosmologique (CMB), les relevés des grandes structures de l'Univers ainsi que les observations des supernovae de type Ia, ont, par leur précision sans précédent, permis d'affiner le modèle cosmologique standard fondé sur la Relativité Générale, et d'inférer dans ce cadre, avec un degré de confiance jamais acquis auparavant, la présence d'énergie noire et de matière noire dans l'Univers. Les observations du CMB ont en outre ouvert une nouvelle fenêtre en cosmologie primordiale. Ces dernières années ont vu une intense activité théorique allant de pair avec les grandes expériences, activité dont la France a pris une part importante.

Pour ce qui concerne la cosmologie primordiale, lieu naturel de rencontre entre physique des hautes énergies et physique gravitationnelle, l'activité de la communauté française a concerné notamment, en lien avec les résultats à venir et les équipes de l'expérience PLANCK, où la France joue un rôle majeur, l'étude des fluctuations primordiales dans le cadre des modèles d'inflation, et particulière-

ment l'étude des non-gaussianités. De nouvelles signatures observationnelles des périodes de «pre-heating», de «re-heating» ainsi que de la transition électro-faible ont été également proposées. Celles-ci pourraient être mises en évidence par les observatoires d'ondes gravitationnelles. Les théoriciens français ont aussi pris une part importante à l'étude de nouveaux modèles d'inflation issus de la théorie des supercordes, à celle des cordes et supercordes cosmiques ainsi qu'à celle de modèles de cosmologie quantique notamment dans le cadre des idées de «paysage» de la théorie des cordes.

Une intense activité théorique a été engendrée par la récente observation de l'expansion accélérée de l'univers qui concerne principalement l'histoire récente (au sens cosmologique) de l'Univers. Cette accélération s'interprète dans le cadre du modèle cosmologique standard, par la présence d'énergie noire (ou d'une constante cosmologique non nulle). Des travaux ont été menés pour étudier l'influence d'éventuelles interactions de l'énergie noire avec la matière noire. Une autre voie, où les théoriciens français ont également joué un rôle important, est l'étude théorique et phénoménologique de modèles alternatifs où la gravitation est modifiée à très grande distance. Il s'agit notamment des modèles de type caméléon, de modèles avec des dimensions supplémentaires ou encore de la «gravitation massive».

## 1.7 ASTROPARTICULES

Les théoriciens français sont impliqués dans l'étude de la matière noire dont l'identité reste mystérieuse, bien qu'elle constitue la majeure partie de la matière non relativiste de l'Univers. De nombreuses expériences essaient de cerner la nature non-baryonique de cette matière, soit quand elle se désintègre et produit un rayonnement détectable par des télescopes gamma comme HESS (pouvant détecter les produits de l'annihilation ou la désintégration de la matière noire), soit par des effets de lentille gravitationnelle, soit encore par la recherche directe d'interactions de cette matière noire

avec un détecteur à faible bruit, comme Edelweiss (situé dans l'environnement propice du Laboratoire Souterrain de Modane).

Du côté théorique, plusieurs modèles ont été proposés, faisant notamment appel à des extensions supersymétriques du Modèle Standard des particules, mais aussi des modèles « Little Higgs », ou des modèles de dimensions supplémentaires. Des chercheurs français sont actifs dans le développement de logiciels permettant de calculer la densité relique de matière noire. Si les soupçons actuels d'événements en détection directe se confirment, ces travaux constitueront un point de contact avec la physique des hautes énergies à un moment où les premiers résultats du LHC sont attendus et devraient éclairer ces problèmes d'un jour nouveau. Dans tous ces efforts, les avancées théoriques sont liées aux progrès expérimentaux et la communauté française est fortement engagée dans les deux directions.

Par ailleurs, des traces de la physique fondamentale nous arrivent du cosmos sous forme de particules variées aux énergies étalées sur 25 ordres de grandeur. Ces signaux sont étudiés par plusieurs expériences comme PLANCK (fond cosmologique à température presque nulle) et AUGER (rayons cosmiques de ultra-haute énergie). Des théoriciens français sont impliqués dans ces expériences en s'intéressant à la physique fondamentale qu'on peut extraire de ces données (telle l'identité de la matière noire), et aussi aux questions astrophysiques attenantes (comme le taux de naissance des étoiles à travers les âges). Les études récentes du flux de neutrinos émis par une supernova suggèrent qu'une telle explosion dans notre galaxie pourrait nous en apprendre plus sur le mécanisme d'explosion des supernovae, et déterminer certaines propriétés des neutrinos.

## 1.8 THÉORIES DE LA GRAVITATION ET ONDES GRAVITATIONNELLES

Dans le domaine de la gravité classique, outre les travaux évoqués plus haut qui concer-

nent la cosmologie, les théoriciens français jouent un rôle important dans l'étude et le suivi des tests de la relativité générale via diverses observations (pulsars binaires, observations dans le système solaire), ainsi que dans les calculs liés aux observatoires, tels que VIRGO ou LIGO, qui cherchent actuellement à obtenir une détection directe d'ondes gravitationnelles. Une telle détection serait une confirmation importante de la relativité générale. Une activité théorique est également en développement autour du futur observatoire LISA, dont la France est partie prenante. Ces travaux concernent la préparation de l'analyse du signal, via des calculs liés aux émissions d'ondes gravitationnelles par des objets astrophysiques, que ce soit par des calculs analytiques ou par des méthodes numériques.

L'interaction gravitationnelle et le problème de sa quantification suscitent de nombreux efforts théoriques où la communauté française est impliquée. Différentes approches sont suivies, principalement en France autour de celles la théorie des supercordes/théorie M, mais aussi de celles de la gravité quantique en boucle ou des mousses de spins. Si ces approches, en particulier celles liées à la théorie des cordes, concernent pour l'instant principalement la physique mathématique (voir plus loin), elles viennent également apporter des idées dans certains des domaines plus phénoménologiques (décrits ci-dessus). Un effort théorique est mené notamment pour construire des modèles réalistes incluant par exemple la supersymétrie, le nombre correct de familles, etc. ou encore utiliser la théorie des cordes pour décrire certains aspects de l'interaction forte.

## 2 – PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

La physique théorique fait appel à de nombreuses méthodes et concepts mathématiques. Souvent, ces notions font appel à des

progrès récents, en cours, ou à découvrir en mathématiques.

Cependant à côté du développement de nouvelles descriptions mathématiques de la réalité physique, les efforts pour comprendre, voire démontrer rigoureusement, les comportements prédits par des théories munies d'un cadre mathématique déjà précisé sont parmi les sujets traditionnels de la physique mathématique. Là où les solutions exactes ou numériques sont difficiles ou impossibles à obtenir, les méthodes de l'analyse mathématique sont souvent la source de progrès importants, surtout quand il s'agit de trouver des réponses qualitatives.

Nous exposons ici les directions de recherche les plus actives développées par les chercheurs de la section 02 en physique mathématique. Selon la dominante des mathématiques utilisées, il est commode de distinguer une direction plus géométrique et algébrique et une autre plus analytique. La théorie des cordes, les théories conformes ou les systèmes intégrables appartiennent à la première, alors que les développements sur les systèmes dynamiques, les équations non linéaires aux dérivées partielles, la mécanique statistique à l'équilibre ou hors équilibre appartiennent à la seconde.

## 2.1 THÉORIE DES CORDES

Ces quatre dernières années ont vu le développement des applications de la correspondance AdS/CFT, des contraintes sur les compactifications de la théorie des cordes, l'analyse des degrés de liberté des trous noirs microscopiques et des théories de jauge perturbatives. Ces progrès se situent souvent à l'interface avec d'autres domaines de la physique fondamentale et des mathématiques, indiquant l'aspect universel des idées issues de la théorie des cordes.

La correspondance AdS/CFT propose une description gravitationnelle classique de certains

systèmes physiques fortement couplés, et qui n'étaient pas jusqu'à présent accessibles à une étude analytique. Le modèle le plus étudié, en particulier grâce à la découverte de symétries cachées et de structures intégrables, est la théorie de Yang-Mills avec supersymétrie maximale à quatre dimensions. Mais la correspondance peut s'appliquer au-delà du cadre initial de cette théorie, et des développements récents ont montré la pertinence de cette description duale pour des phénomènes tels que le plasma de quarks et gluons ou, de façon plus spéculative, pour des systèmes de fermions fortement corrélés en matière condensée.

À l'interface avec les mathématiques, l'analyse des degrés de liberté microscopiques des trous noirs se fait facilement lorsque ceux-ci préservent beaucoup de supersymétries. Dans les théories avec moins de supersymétries, l'espace des paramètres des trous noirs présente des zones de stabilité séparée par des plans, ou murs. La traversée des plans donne lieu à des phénomènes de désintégrations. L'évaluation de l'intégrale de chemin sur toutes les configurations contribuant à l'entropie d'un trou noir se trouve compliquée par ces phénomènes. Les progrès récents accomplis par M. Kontsevich et Y. Soibelman dans l'analyse des propriétés mathématiques des zones de stabilité seront sûrement centraux pour une compréhension complète de ces phénomènes. De façon plus générale, l'analyse des symétries discrètes de la théorie des cordes, dont on ne perçoit actuellement qu'une petite partie, reste un domaine fertile de recherche à l'interface entre physique et mathématiques.

Grâce à une compréhension accrue du rôle de la supersymétrie et de l'intégrabilité dans les calculs perturbatifs en théorie de jauge et de supergravité, il est possible d'évaluer un grand nombre d'amplitudes en diverses dimensions et pour diverses configurations des états externes, pertinentes pour la physique des particules. Pour accomplir ces calculs, il a été nécessaire de mettre à jour des symétries inattendues des amplitudes en théorie de jauge, et ces progrès permettent l'évaluation numérique d'un grand nombre de quantités pertinentes pour la physique du LHC.

Enfin, l'analyse et la construction de solutions de la théorie des cordes s'approchant de la physique du modèle standard sont toujours en plein développement. Des structures géométriques qui incorporent les flux et les symétries de dualité jouent un rôle important sur le plan à la fois théorique et phénoménologique.

## 2.2 THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS, THÉORIES CONFORMES ET SYSTÈMES INTÉGRABLES

La théorie des champs conformes et celle des systèmes intégrables font partie des grands succès de la physique mathématique moderne. Leur étude se poursuit très activement.

Les théories conformes bidimensionnelles décrivent à la fois des phénomènes critiques et des solutions classiques de la théorie de cordes. Des méthodes algébriques puissantes ont permis de classer les théories rationnelles, et de calculer le spectre de dimensions conformes et les fonctions de corrélation. Mais plusieurs directions de recherche restent ouvertes : (1) les théories non-compactes, dont l'exemple type est la théorie de Liouville, ne sont que partiellement comprises ; (2) les théories logarithmiques, qui apparaissent comme limites critiques de certains modèles de mécanique statistique comme la percolation, ne peuvent pas être étudiée avec les outils disponibles à présent ; (3) les observables non-locales – opérateurs de défaut ou courbes SLE – restent l'objet d'études intensives. Par ailleurs, la théorie de cordes et la correspondance AdS/CFT ont ouvert une fenêtre sur les théories conformes à plus de deux dimensions, pour lesquelles les outils bidimensionnels (algèbres infinies, groupes de tresses, etc.) ne sont pas adaptés.

En mécanique statistique, l'invariance d'échelle est à la base de toute approche moderne afin de comprendre le comportement collectif des systèmes avec un très grand nombre de degrés de liberté, interagissant fortement entre eux. Son extension vers l'invariance conforme rend accessibles les outils

mathématiques précédents. Leur application en physique statistique, dans la matière condensée, ou encore dans la théorie des cordes et la physique des particules élémentaires à très hautes énergies, a ouvert des avenues novatrices. Parmi les avancées majeures récentes figurent la description de structures géométriques fluctuantes comme on les rencontre dans des interfaces critiques ou bien l'étude des systèmes désordonnés bidimensionnels ou la turbulence bidimensionnelle. L'adaptation de l'invariance conforme hors de son contexte d'origine produit également des nouvelles idées en dynamique hors d'équilibre, notamment dans l'étude des verres et en vieillissement physique. Des progrès futurs dépendront aussi d'une interdisciplinarité renforcée, en particulier avec les méthodes probabilistes, mais aussi avec celles provenant la physique non linéaire et de la théorie des matrices aléatoires et des problèmes de combinatoire reliés.

Pour les systèmes intégrables, des avancées sur le calcul des fonctions de corrélation, principalement réalisées en France, ouvrent de nouvelles perspectives. Les applications multiples génèrent à leur tour un approfondissement de la compréhension de ces systèmes. La place centrale des systèmes intégrables dans la correspondance AdS/CFT a déjà été mentionnée. Des progrès récents dans le domaine des matrices aléatoires montrent une convergence des méthodes toujours plus étroite avec les systèmes intégrables. Des applications inattendues à des problèmes de combinatoire se développent rapidement. Dans tous ces domaines, les chercheurs français jouent un rôle de premier plan.

La mécanique statistique et la matière condensée apportent une grande variété de nouvelles applications où l'accent est mis maintenant sur les phénomènes hors équilibre et les phénomènes de transport. Les résultats récents sur les fonctions de corrélation auront un impact immédiat dans ces domaines traditionnels d'applications des théories conformes et des systèmes intégrables.

En théorie quantique des champs perturbative, de nouveaux outils puissants (algèbres

de Hopf) sont apparus, qui permettent de reformuler la théorie de la renormalisation et d'entrevoir de nouveaux développements. Ces techniques trouvent naturellement de nouveaux domaines d'applications comme la renormalisation des modèles en espace courbes ou non commutatifs.

Le problème de la quantification de la gravité suit deux approches : l'une est la théorie des cordes qui contient intrinsèquement une description de la gravitation et qui a déjà passé certains tests de cohérence comme, par exemple, la finitude perturbative, l'absence d'anomalies, le calcul de l'entropie microscopique des trous noirs. Une autre approche est la gravité quantique à boucles (LQG) qui est un programme visant à quantifier la gravitation en préservant les symétries classiques de difféomorphisme de la relativité générale selon une approche hamiltonienne des systèmes contraints. La quantification de tels systèmes contraints est difficile et fait appel à un formalisme mathématiquement sophistiqué. Afin de contourner les difficultés associées à la quantification de la contrainte hamiltonienne, et de s'assurer que la limite classique permette de retrouver la relativité générale, un formalisme de mousse de spins décrivant la propagation dans l'espace temps d'états de graphes colorés est développé. Certaines applications à la cosmologie et aux calculs des états microscopiques des trous noirs ont été considérées récemment.

## 2.3 SYSTÈMES DYNAMIQUES ET ÉQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES

Les méthodes de l'analyse mathématique continuent à jouer un rôle très important dans l'étude des équations non linéaires aux dérivées partielles de la physique. Étant donné leur place centrale en physique les domaines concernés sont très divers et il faut se reporter aux chapitres adéquats dans ce rapport de notre section, ainsi qu'aux contributions des

autres sections concernées pour des descriptions plus détaillées. Ceci concerne aussi bien la relativité générale où des résultats nouveaux ont été obtenus sur la dynamique de trous noirs, que la physique des plasmas où la naissance des singularités et les effets subtils de dissipation non linéaire ont été élucidés récemment par des mathématiciens. Les questions fondamentales sur l'existence des singularités dans les équations d'Euler ou de Navier-Stokes restent cependant ouvertes malgré des progrès récents dans le domaine complexe.

L'effort de pluridisciplinarité de la fin du  $xx^e$  siècle dans le domaine du chaos a fourni des outils utilisés par les mathématiciens d'une part, les scientifiques intéressés par les applications d'autre part. Du point de vue des mathématiques, il faut mentionner la très fructueuse activité qui se poursuit en France dans le domaine des systèmes dynamiques différentiables. Du point de vue des applications, citons les importantes études sur la stabilité du système solaire, ou encore des applications à la géophysique.

## 2.4 MÉCANIQUE STATISTIQUE RIGOUREUSE À L'ÉQUILIBRE OU HORS ÉQUILIBRE

Une autre direction traditionnelle de la physique mathématique étudie la mécanique quantique non relativiste des systèmes à grand nombre de corps. Ici beaucoup d'activités récentes concernent la validation rigoureuse des descriptions effectives du type champ moyen dont l'intérêt a été renforcé récemment par les expériences sur les atomes froids et la condensation de Bose-Einstein. Des résultats rigoureux sur l'existence du condensat dans les pièges et sur sa dynamique ont été obtenus récemment.

Les travaux sur la modélisation et l'analyse des systèmes quantiques ouverts rejoignent ceux sur l'analyse de systèmes classiques hors d'équilibre par exemple dans les avancés

importantes sur le fondement des approches cinétiques ou dans les démonstrations des comportements diffusifs à grandes échelles dans les systèmes-modèles. Dans la mécanique statistique hors d'équilibre, des résultats mathématiques importants ont été obtenus par la combinaison de méthodes probabilistes et de solutions exactes, sur la statistique des fluctuations dans des systèmes simples étendus avec des interactions aléatoires.

La recherche mathématique sur les systèmes avec désordre continue à faire des progrès aussi bien dans l'analyse des propriétés dynamiques que dans celles de l'équilibre dans le prolongement des avancées importantes des années précédentes.

## 2.5 PROCESSUS STOCHASTIQUES ET GÉOMÉTRIE ALÉATOIRE

Le mouvement brownien est un objet fondamental de la physique théorique moderne et il a permis d'expliquer beaucoup d'effets observés dans les systèmes physiques. Décrire les propriétés de persistance et les probabilités des valeurs extrêmes sont des questions ouvertes dans la physique statistique et dans les mathématiques appliquées, notamment dans la théorie des matrices aléatoires. De même, comprendre la nature de courbes ou trajectoires aléatoires est un problème récurrent en physique et en mathématique. Depuis une dizaine d'années, des progrès significatifs ont été obtenus dans leur description dans le cas où ces courbes manifestent une propriété d'invariance conforme, suite à la découverte de processus stochastiques adaptés (processus SLE, découvert par O. Schramm) et de leurs liens avec la physique statistique des systèmes critiques bidimensionnels.

L'introduction de ces processus SLE a abouti à une description rigoureuse des interfaces critiques bidimensionnelles et a conduit à l'introduction d'outils et d'un langage probabilistes au sein des théories champs conformes. Bien que notre connaissance des processus

SLE soit maintenant assez profonde, de nouvelles directions de recherche émergent : la description des courbes aux voisinages des points critiques est aujourd'hui encore embryonnaire, le lien entre ces courbes aléatoires et la théorie des surfaces aléatoires (gravité bidimensionnelle) reste à développer.

Plus généralement le mouvement brownien est aujourd'hui utilisé dans plusieurs domaines de la science pour comprendre le comportement des marchés financiers, la dynamique de molécules complexes à l'intérieur de la cellule ou encore les stratégies de recherche de nourriture des animaux. Pour décrire les fluctuations dans ces systèmes, il est souvent nécessaire d'aller au delà du monde brownien et comprendre les effets liés aux corrélations et aux milieux hétérogènes.

## 2.6 CHAOS, MATRICES ALÉATOIRES

La théorie des matrices aléatoires a des applications physiques abondantes, allant de la physique nucléaire et atomique à la matière condensée, la physique statistique et des hautes énergies et la gravité quantique, et continue de susciter beaucoup d'activités. Les travaux récents sur les matrices aléatoires revêtent un caractère plus analytique avec l'analyse des ensembles sans symétries particulières et des résultats difficiles sur l'universalité de leurs comportements ont été obtenus en mathématiques. La pertinence de la théorie des matrices aléatoires pour décrire les systèmes quantiques chaotiques et/ou désordonnés est maintenant bien établie. Des résultats marquants ont été obtenus sur les statistiques des valeurs extrêmes, dans différents ensembles plus ou moins conventionnels de matrices aléatoires. Beaucoup de phénomènes physiques étant gouvernés par des grandes fluctuations, cela pourrait se révéler fécond en physique statistique des événements rares ou loin de l'équilibre. Une autre direction très dynamique, liée aux grandes matrices, concerne les limites continues des applications fluctuantes.

## 3 – MÉCANIQUE STATISTIQUE ET PHYSIQUE NON LINÉAIRE

### 3.1 SYSTÈMES HORS D'ÉQUILIBRE

Les théorèmes de fluctuation qui ont été mis au jour depuis une quinzaine d'années ont apporté un éclairage nouveau à la question de l'irréversibilité (résultant de dynamiques microscopiques réversibles), et fourni un ensemble de relations exactes permettant en particulier d'obtenir des potentiels thermodynamiques d'équilibre à partir de mesures hors d'équilibre. Dans ce corpus, les fonctions de grande déviation se sont imposées comme une nouvelle pierre angulaire de la mécanique statistique, en ce sens qu'elles jouent pour les systèmes hors d'équilibre un rôle potentiellement analogue à l'énergie libre d'équilibre. De telles approches, dont le pendant quantique devrait être exploré plus en profondeur, sont particulièrement appropriées pour l'étude de systèmes de petite taille. Elles devraient permettre une meilleure compréhension de dispositifs miniaturisés (micro-fluidique, biologiques etc.). Un domaine porteur en la matière est par ailleurs celui des modèles solubles, précieux pour la mise en place d'une mécanique statistique hors d'équilibre.

Une nouvelle classe de systèmes hors équilibre est fournie par les systèmes avec interactions à longue portée, définis par une énergie qui diverge plus vite que le volume. De tels systèmes, non additifs, peuvent présenter des comportements thermodynamiques inhabituels, tels que chaleur spécifique négative ou non équivalence d'ensembles thermodynamiques. En particulier, la compréhension de la dynamique de tels systèmes a connu récemment un nouvel essor, notamment dans l'étude de la relaxation lente vers l'équilibre et la description de l'évolution sur des temps longs et leurs fluctuations au voisinage des transitions de phase et de multi-stabilités. Des exemples concrets abondent, en passant des

systèmes autogravitants aux écoulements géophysiques (par exemple sur des échelles de temps d'évolution climatique) et à la magnétohydrodynamique. Ce retour vers les domaines d'application devrait également stimuler les développements théoriques dans de nouvelles directions, souvent en lien avec la physique hors équilibre du type « dynamique forcée », comme on peut le trouver dans les systèmes non conservatifs, des bruits corrélés ou des transitions de phase induites par le bruit. Il y a là sans doute un gros potentiel de développement pour cette thématique.

### 3.2 MILIEUX GRANULAIRES ET MATIÈRE MOLLE

Les milieux granulaires représentent un domaine d'application privilégié de travaux de type « premiers principes », utiles dans un panorama dominé par des approches phénoménologiques, où le sens physique est par ailleurs souvent malmené par les observations expérimentales et numériques. Un défi d'actualité tient dans la rhéologie des écoulements granulaires génériques, mal comprise bien que les effets non newtoniens soient la règle plus que l'exception (c'est là une différence essentielle avec les liquides ordinaires). L'objectif est donc d'étendre aux systèmes denses les descriptions de type milieu continu qui ont été obtenues dans les dix dernières années pour les systèmes dilués. À une échelle plus micrométrique, les grains forment des dispersions colloïdales, que l'on peut voir comme des systèmes fortement couplés dès lors que les effets coulombiens sont à l'œuvre. Les condensats ioniques résultant présentent des comportements mal compris (dont l'inversion de charge) qui signent à température ambiante des effets d'ordinaire propres aux basses températures. Ces systèmes présentent également un défi pour les méthodes numériques, qui ne permettent à l'heure actuelle pas une prise en compte satisfaisante des différentes échelles pertinentes, aussi bien de longueur que de temps. Un axe porteur et riche d'application

concerne la manipulation des dispersions colloïdales par des champs extérieurs. Enfin, une question majeure porte sur la dynamique lente de ces systèmes, en lien avec la transition vitreuse.

### 3.3 SYSTÈMES DÉSORDONNÉS ET THÈMES AUX INTERFACES

Souvent le désordre peut changer le comportement qualitatif des systèmes physiques. La présence d'impuretés est à l'origine de phénomènes comme la métastabilité, le piégeage ou la dynamique par avalanches. De nombreux progrès ont été fait en physique statistique grâce à la combinaison de méthodes probabilistes (techniques 1d, graphes aléatoires), de notions physiques (loi d'échelle, universalité) et des algorithmes d'optimisation. Beaucoup de questions restent ouvertes comme, l'existence d'une transition dans les verres structuraux, la description théorique d'un système désordonné au delà du champ moyen ou de la dynamique activée en présence d'un grand nombre de barrières. Des méthodes de théorie des champs et de renormalisation fonctionnelle ont été développées pour prédire les comportements de ces systèmes.

Récemment la théorie des systèmes vitreux a fourni des outils pour comprendre les comportements collectifs des systèmes frustrés formés de nombreuses particules en interactions fortes. Ces développements ouvrent de nombreuses possibilités d'applications aux « systèmes complexes » où les « particules » peuvent être de nature très diverses, allant des agents sur un marché à des variables logiques.

Les résultats obtenus dans le contexte des problèmes de théorie de l'information comme la satisfaction de contraintes aléatoires et les codes de correction d'erreur avec les techniques inspirées de la physique des verres de spins, offrent une illustration de ces nouvelles possibilités.

### 3.4 PROCESSUS STOCHASTIQUES

Le mouvement brownien est un objet fondamental de la physique théorique moderne et il a permis d'expliquer beaucoup d'effets observés dans les systèmes physiques. Aujourd'hui il est utilisé dans plusieurs domaines de la science pour comprendre le comportement des marchés financiers, la dynamique de molécules complexes à l'intérieur de la cellule ou encore les stratégies de recherche de nourriture des animaux. Pour décrire les fluctuations dans ces systèmes, il est souvent nécessaire d'aller au delà du monde brownien et comprendre les effets liés aux corrélations et aux milieux hétérogènes.

Décrire ces nouveaux processus stochastiques, les propriétés de persistance et les probabilités des valeurs extrêmes sont des questions ouvertes dans la physique statistique et dans les mathématiques appliquées.

### 3.5 INVARIANCE CONFORME

L'invariance d'échelle est à la base de toute approche moderne afin de comprendre le comportement collectif des systèmes avec un très grand nombre de degrés de liberté, interagissant fortement entre eux.

Son extension vers l'invariance conforme rend accessibles les outils spécifiques des théories de champs invariantes conformes et celles des systèmes intégrables. Leur application en physique statistique, dans la matière, ou encore dans la théorie des cordes et la physique des particules élémentaires à très hautes énergies, a ouverte des avenues novatrices. Parmi les avancées majeures récentes figurent la description de structures géométriques fluctuantes comme on les rencontre dans des interfaces critiques ou bien l'étude des systèmes désordonnés bidimensionnels ou la turbulence bidimensionnelle. L'adaptation de l'invariance conforme hors de son contexte d'origine produit également des nouvelles idées en dyna-

mique hors d'équilibre, notamment dans l'étude des verres et en vieillissement physique. Des progrès futurs dépendront aussi d'une interdisciplinarité renforcée, en particulier avec les méthodes probabilistes, mais aussi avec celles provenant la physique non linéaire et de la théorie des matrices aléatoires et des problèmes de combinatoire reliés.

### 3.6 PHYSIQUE NON-LINÉAIRE

La physique non-linéaire est un domaine où «l'école française», physiciens théoriciens mais aussi mathématiciens et expérimentateurs, a joué un rôle très important dans les quarante dernières années, avec des contributions marquantes qui vont de la dynamique des systèmes à petit nombre de degrés de liberté, à la formation de structures dans les domaines étendus, au chaos spatio-temporel et à la turbulence. De nombreuses questions anciennes restent ouvertes et nous tentons d'en décrire quelques-unes qui nous paraissent centrales. À côté de ce domaine classique, la source d'inspiration de disciplines voisines est incontestable. Le domaine de recherche de la communauté voit donc ses limites s'étendre et les physiciens du non-linéaire contribuent de façon importante à des disciplines variées. On notera bien sur l'influence ancienne de la géophysique, de l'astrophysique ou de la science des matériaux mais aussi et de façon croissante celle de la biophysique et même de l'économie et des sciences sociales. D'un point de vue méthodologique, la progression énorme des capacités de calcul des ordinateurs ainsi que la quantité croissante des données de tous ordres nouvellement disponibles jouent un rôle important, qui certainement ne fera que grandir sur l'orientation des recherches de la communauté.

### 3.7 HYDRODYNAMIQUE, TURBULENCE

Comprendre et décrire de façon précise la turbulence détaillée est l'un des grands problèmes ouverts de la physique classique. L'activité autour des phénomènes turbulents est encore très riche non plus seulement en ce qui concerne les situations homogènes-isotropes mais aussi dans certains contextes plus précis comme les couches limites ou les transitions dans divers écoulements. La possibilité de suivre des particules dans un écoulement turbulent a renouvelé très fortement la discipline tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique, cette approche Lagrangienne étant un excellent complément à l'approche Eulérienne, plus traditionnelle. De très jolis résultats récents expérimentaux, numériques et théoriques augurent d'une activité soutenue dans les années qui viennent.

Depuis plusieurs années, la turbulence faible (ou turbulence d'ondes) est devenue aussi une question très active tant au niveau théorique qu'expérimental. Elle s'intéresse aux propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction. L'archétype est l'étude de l'état aléatoire des ondes à la surfaces de l'eau générées par le vent, mais des situations très similaires ont été récemment étudiées pour les ondes de gravités internes en océanographie, les ondes d'Alfvén du vent solaire, les ondes radars de l'ionosphère, les ondes de spins dans les solides, les ondes en optique non linéaire, les ondes quantiques des condensats de Bose, les ondes de Langmuir dans les plasmas... C'est un bel exemple où les études théoriques ont été relancées par des avancées expérimentales ou par la multiplicité des domaines d'applications de ces questions. Enfin, il nous faut mentionner la magnéto-hydrodynamique où l'observation récente de l'effet dynamo et de renversements spontanés du champ magnétique engendré dans un écoulement expérimental forcé, stimule l'activité théorique et numérique sur cette question fondamentale mais aussi cruciale pour l'astrophysique.

### 3.8 PHYSIQUE DES PLASMAS

Les plasmas, naturels ou de laboratoire, depuis les plus simples décharges électriques jusqu'aux plasmas de fusion, constituent des systèmes non linéaires complexes pouvant être le siège de phénomènes d'auto-organisation associés au développement d'instabilités variées.

À cet égard les plasmas chauds confinés par des champs magnétiques constituent un objet d'étude particulièrement intéressant. La dynamique d'un tel plasma implique en effet le couplage d'échelles -en temps et en longueur - très différentes, et des physiques différentes selon la région du plasma. Dans le cœur très chaud, où les effets d'auto-organisation magnétique dominant, un problème actuel et d'intérêt également en astrophysique, est celui de la reconnexion magnétique. Ce cœur est entouré d'une région où, sous l'effet d'énormes gradients transverses, se développe une turbulence induisant un transport convectif de chaleur et de matière.

Comme dans les écoulements géostrophiques et avec l'effet dynamo, on peut y observer la génération spontanée de mouvements globaux à partir de la turbulence. Ces écoulements (« zonal flows »), qui apparaissent ainsi dans une étroite couche de cisaillement sur le bord du plasma peuvent constituer des barrières de transport efficaces et conduire à des régimes dits de confinement améliorés. La compréhension et le contrôle de ces mécanismes universels sont ainsi de première importance dans le cadre des recherches sur la fusion par confinement magnétique.

### 3.9 UN RENOUVEAU DE LA MÉCANIQUE DES SOLIDES ET DE LA SCIENCE DES MATÉRIAUX

L'intérêt des physiciens théoriciens pour la mécanique et la science des matériaux,

sciences anciennes s'il en est, connaît actuellement un grand renouveau. Comme dans beaucoup d'autres cas, ce n'est pas le solide parfait qui pose question, mais le matériau désordonné que ce soit dans sa structure même, ou simplement dans sa forme macroscopique. La microstructure de la plupart des métaux ou des alliages communs est en effet un produit complexe de leur histoire et de leur mode de fabrication et la compréhension fine de leurs caractéristiques reste un important défi. Une compréhension approfondie peut être attendue de la possibilité de simulations numériques raffinées, avec des méthodes existantes comme la dynamique moléculaire ou les méthodes de champ de phase en plein développement, ou des techniques encore à inventer, qui stimuleront elles-mêmes des développements théoriques nouveaux.

Au delà de ces structures mésoscopiques, l'élasticité non-linéaire, la plasticité et les formes complexes, pliage, froissage, fractures, déchirures, résultant de contraintes macroscopiques sont un sujet d'étude qui se développe très activement, en parallèle avec nombre d'expériences « légères ». Comme nous le verrons ci-dessous, la description de mécanismes gouvernant des structures biologiques végétales (feuille, bourgeon...) ou animales (cellules, tissus...) est un moteur de nombreuses études. Enfin, les milieux granulaires, dont la compréhension a beaucoup progressé, que ce soit pour la description des structures statiques ou des écoulements et de la formation de structures variées, telles que les rides formées par l'eau ou le vent, dunes, restent un sujet de grand intérêt pour les physiciens du non-linéaire.

## 4 – MATIÈRE CONDENSÉE

La découverte il y a une vingtaine d'années des supraconducteurs à haute température critique, suivant celle de l'effet Hall quantique et précédant les développements technologiques

considérables sur les nano-matériaux ont amplement démontré les limites des descriptions des matériaux en termes de fonction d'ondes d'électrons indépendants et des méthodes perturbatives. Ils ont même conduit dans certains cas à remettre totalement en cause le paradigme de Landau du liquide de Fermi qui consiste à décrire la physique de basse énergie des conducteurs comme une extension de la théorie des gaz de Fermi avec des quasi particules de spin  $1/2$ , « électrons habillés » en interaction supposée faible. Un tournant méthodologique et conceptuel s'est avéré nécessaire, défi que la physique théorique française a très bien relevé. On retrouve aujourd'hui les physiciens théoriciens de la matière condensée sur un très grand nombre de fronts actifs du domaine : depuis les systèmes unidimensionnels où les avancées des théoriciens de la matière condensée rejoint ceux de la physique mathématique, l'effet Hall quantique fractionnaire, la physique mésoscopique, les liquides de spins et les isolants topologiques, la glace de spins et ses « monopoles de Dirac », jusqu'à l'étude approfondie des matériaux quantiques fortement corrélés : fermions lourds, supraconducteurs à haute température critique. Les progrès récents sur l'ensemble de ces sujets de la matière condensée ont été mis en œuvre à travers toute la panoplie des outils de la physique théorique : théories des champs et théories de jauge pour décrire les modélisations des excitations exotiques émergentes, groupe de renormalisation fonctionnel et/ou « non perturbatif », et méthodes numériques, DMRG, Monte Carlo quantique et diagonalisations exactes pour les problèmes couplés les plus difficiles. Dans le domaine des matériaux quantiques fortement corrélés la DMFT et ses extensions a construit un pont imprévu entre physique théorique et chimie des matériaux. L'ensemble des objets d'étude ci-dessus a d'importantes connections avec les thèmes fondamentaux de chaos quantique, de décohérence, le problème de la fabrication de bits quantiques, les notions d'intrication quantique et la question de la faisabilité d'un ordinateur quantique.

## 4.1 SYSTÈMES UNIDIMENSIONNELS

Chronologiquement la première déviation au paradigme du liquide de Fermi est apparue dans les systèmes 1-d, où toutes les subtilités de la séparation des dynamiques de spin et de charge ont lentement émergé (Ansatz de Bethe, liquide de Luttinger). Ce champ de recherche, difficile, est toujours très vivant : plusieurs outils théoriques y sont appliqués, Ansatz de Bethe, bosonisation, et méthodes numériques (diagonalisations exactes et DMRG). Ces diverses méthodes ont permis la construction des diagrammes de phase des chaînes de spins dopées ou l'étude des propriétés des atomes froids piégés dans des réseaux optiques unidimensionnels. Une des frontières actuelles concerne la détermination des fonctions de structure dynamique de différents modèles unidimensionnels, tels que le modèle de Bose-Hubbard attractif et celui de Yang-Gaudin. Les matériaux synthétiques, les polymères conducteurs sont l'objet d'une intense activité expérimentale en particulier autour des grands instruments, activité qui bénéficie largement de l'interaction théorie-expérience : propriétés optiques, transfert de charge en présence de défauts topologiques (solitons). De nombreux matériaux en échelle (constitués de 2 systèmes unidimensionnels couplés) ont élargi le champ des possibles théoriques d'une manière tout à fait intéressante. Les expériences sur les atomes froids (gaz de Tonks-Girardeau, limite unitaire) devraient permettre des progrès supplémentaires dans cette fructueuse coopération théorie-expérience. La physique des états liés à trois corps dans le régime unidimensionnel est un des exemples de telles avancées. Un des défis des prochaines années est le transport dans les systèmes quantiques désordonnés avec interactions fortes. Les atomes froids ont ici permis l'observation directe de la localisation d'Anderson en 1d, mais cette problématique dépasse le cadre des atomes froids, puisque la thématique est également déclinée avec des ondes sismiques, acoustiques, électromagnétiques.

## 4.2 L'EFFET HALL QUANTIQUE FRACTIONNAIRE

L'effet Hall quantique fractionnaire a été le premier sujet de physique des solides, où l'introduction des modélisations en termes d'excitations élémentaires de charge fractionnaire et de statistiques anyoniques (ni fermionique ni bosonique) s'est avérée extrêmement fructueuse. L'effet Hall quantique fractionnaire se manifeste dans les systèmes d'électrons dans les semi-conducteurs. La possibilité de les observer dans la physique des atomes bosoniques froids en régime de rotation rapide, fait l'objet d'une recherche active. En fait la théorie des fermions composites a permis de donner une description satisfaisante de nombreux états quantiques fractionnaires. Mais tous les efforts actuels se concentrent sur la fraction dite « du remplissage  $5/2$  » dont les excitations présentent peut-être une statistique non-abélienne encore plus riche que les statistiques anyoniques des fractions expliquées par les fermions composites.

## 4.3 MATÉRIAUX À FORTES CORRÉLATIONS QUANTIQUES

Ce sont des matériaux à bandes étroites (métaux de transition, leurs oxydes, composés de terres rares et d'actinides), dans lesquels les électrons « hésitent » entre un comportement itinérant et un comportement localisé (voisinage de la transition de Mott). La création par le CNRS il y a une quinzaine d'années du GDR « Fermions fortement corrélés » visait à la constitution d'une synergie entre les physiciens théoriciens purs, ceux de la matière condensée plus traditionnelle et les expérimentateurs de physique des solides et de chimie des matériaux : les résultats obtenus sont une preuve grandeur nature du bien fondé d'une telle démarche. Les activités des équipes françaises dépendant de la commission 02 recouvrent un spectre d'activités large depuis des développe-

ments purement théoriques (comme par exemple la construction d'une vision unifiée de la superfluidité depuis l'échelle microscopique de Bogolioubov, jusqu'à l'approche hydrodynamique de Popov à l'aide du groupe de renormalisation non perturbatif) jusqu'à des questions orientées vers la physique des matériaux, voire des applications (par exemple liées aux propriétés optiques ou thermoélectriques d'oxydes de métaux de transition ou de composés de terres rares). Un des moteurs de ce dernier progrès est la « théorie du champ moyen dynamique » (en abrégé DMFT pour « Dynamical Mean-Field Theory ») dont l'idée générale consiste à décrire globalement le solide comme un « atome effectif sur un site » plongé dans un milieu auto-cohérent avec lequel il peut échanger des électrons. Le premier succès de cette approche a été la description théorique détaillée de la transition métal-isolant de Mott. Le calcul des spectres de photoémission résolus en angle ont ensuite conduit à des *prédictions quantitatives* pour les expériences d'ARPES, dont certaines ont été depuis testées avec succès. L'extension de la méthode au traitement de plusieurs sites voisins dans un champ moyen dynamique (cluster-DMFT) a permis d'expliquer les observations expérimentales sur les cuprates (formation d'arcs de Fermi et comportement de la conductivité inter-plans) et l'origine des deux échelles d'énergie quasi-particules et pseudo-gap observées dans plusieurs spectroscopies (Raman, STM). L'intégration des méthodes à N corps aux calculs de structure électronique (fonctionnelle de densité dans l'approximation de la densité locale), qui nécessite de nombreux développements techniques, dans le cadre de codes numériques souvent assez sophistiqués représente le mariage réussi de l'intuition du chimiste avec les méthodes quantitatives de la physique. Ces méthodes versatiles permettent également une interaction avec les expériences sur les atomes froids, en plein développement.

## 4.4 LIQUIDES DE SPINS, GLACE DE SPINS, ISOLANTS TOPOLOGIQUES, Q-BITS QUANTIQUES

Dans les isolants près de la transition de Mott les effets quantiques conjugués à la frustration des interactions et à la topologie du réseau conduisent à l'apparition de phases nouvelles : liquides de spins, glaces de spins. Dans les liquides de spins la formation de paires singlettes (de spin nul) en résonance sur le réseau conduit à l'apparition des phases nouvelles. Le premier de ces archétypes est une phase gappée, dont les excitations de basse énergie peuvent être décrites dans une théorie de jauge  $Z_2$  non confinante : une partie des excitations de basse énergie sont des excitations fractionnaires de spins  $1/2$ , d'autres excitations de jauge plus subtiles restent à identifier dans un certain nombre de modèles rentrant dans le cadre plus large posé initialement par Kitaev. L'état fondamental de ces modèles a une dégénérescence topologique et représente le premier système modèle pour un bit quantique protégé de la décohérence par l'environnement parce que essentiellement insensible aux perturbations locales. Cette idée, de coder de l'information quantique dans des états collectifs macroscopiquement distincts a été mise en œuvre dans les réflexions – couplées aux réalisations expérimentales – sur réseaux de Josephson : un chantier considérable et à première vue très prometteur. Les modèles de Kitaev eux-mêmes sont l'objet de nombreuses études, compréhension du rôle des symétries non-locales, nature des excitations abéliennes ou non, liens entre modèles d'Ising quantiques et théorie de jauge avec termes de Chern-Simmons. La réflexion autour des ces états intriqués conduit également à des propositions de nouveaux algorithmes prometteurs (MERA) qui mériteraient très probablement d'être étudiés en France. Une deuxième catégorie de liquides de spins non triviaux apparaît dans des systèmes quantiques dont le fondamental classique présente une entropie extensive du fait de la topologie

du réseau. Dans cette catégorie, le problème de Heisenberg sur le réseau kagomé (un réseau d'étoiles de David) reste un problème ouvert. Les expériences *suscitées par les réflexions théoriques* ont mis en évidence des systèmes magnétiques qui restent fluctuant jusqu'à des températures de l'ordre de trois à quatre ordres de grandeur plus petits que la constante de couplage. Sur le réseau pyrochlore qui rentre dans cette même catégorie, la présence d'interactions dipolaires (naturelles dans de tels matériaux), conduit à des configurations fondamentales appelées « spin-ice » en analogie avec la glace. La frustration subie par les moments magnétiques sur de tels réseaux conduit à un fractionnement des dipôles magnétiques en quasi particules porteuses d'une charge magnétique monopolaire. Les transitions de phases dans le gaz de Coulomb de ces monopoles et plus encore la dynamique de ces excitations émergentes reste un problème ouvert. Il semble probable que seule une petite partie de l'iceberg des théories émergentes avec excitations exotiques en physique des solides ait été explorées à ce jour. Les progrès expérimentaux demeurent difficiles parce qu'à l'état naturel les matériaux combinent a priori toutes les difficultés d'approche : impuretés, défauts, interactions « parasites » sont toujours présents. Et il n'y existe en général pas de « bouton » pour faire varier les paramètres de couplage. Donc l'aller retour entre les théoriciens, les numériciens modélisateurs et les expérimentateurs de physique des solides et les chimistes est absolument essentiel. Dans cette problématique, les gaz atomiques ultra-froids sont des laboratoires sous contrôle très intéressants (voir ci-dessous), quand bien même ils sont actuellement un peu « trop chauds » par rapport à la physique très fortement couplée abordée dans ce paragraphe. Par ailleurs le désordre dans ces systèmes quantiques semble ouvrir des questions nouvelles et différentes de celles de verres de spins « classiques ». Le corpus de résultats expérimentaux est actuellement sans doute insuffisant pour que le problème du désordre mérite d'être remis sur l'ouvrage à très court terme, mais la situation évoluera peut-être assez vite.

## 4.5 PHYSIQUE MÉSCOPIQUE

L'enjeu est de décrire des systèmes dont la température/la taille est suffisamment basse/réduite pour que la propagation des porteurs de charge s'effectue en préservant leur cohérence de phase. La décohérence est étudiée dans les réseaux complexes de fils métalliques diffusifs dans le régime de la localisation faible, et/ou de l'effet Aharonov Bohm. On s'intéresse en particulier à la décohérence de phase due aux interactions électron-électron. Cette physique mésoscopique tout à fait essentielle dans le domaine « nano », (domaine sur lequel porte de considérables efforts expérimentaux) est bien représentée dans notre communauté. Elle se concentre actuellement à la fois sur l'étude de l'état fondamental ou de l'équilibre thermodynamique de systèmes fermés et sur les propriétés de transport des systèmes ouverts hors équilibre. Ces derniers correspondent aux situations expérimentales réelles où les échantillons mésoscopiques sont connectés à des contacts et souvent polarisés en tension. Cette physique se pratique sur une grande variété de systèmes propres à la physique de la matière condensée, tels que les systèmes unidimensionnels, les boîtes quantiques connectés à des bornes de différente nature, les systèmes hybrides contenant des composants supraconducteurs, ferromagnétiques ou autres. L'injection d'électrons sur les fils quantiques tels que les nanotubes de carbone ou les états de bord dans l'effet Hall quantique fractionnaire permet de détecter quelles sont les charges (fractionnaires) associées aux excitations collectives de ces liquides de Luttinger qui interviennent dans le transport. Le diagnostic s'effectue à partir du calcul du courant et de ses moments supérieurs (bruit), en tenant compte des effets de taille finie ou d'écrantage. On s'intéresse également dans de tels systèmes à la détection du bruit haute fréquence à l'aide de circuits quantiques directement couplés au circuit mésoscopique que l'on veut mesurer. Une autre partie de l'activité en physique mésoscopique concerne les boîtes quantiques. Dans ces dernières, on aborde la problématique du chaos quantique à

l'aide d'approches semi-classiques et de matrices aléatoires. Dans ces mêmes systèmes, le problème de l'effet Kondo est abordé. Ce dernier peut s'explorer dans le cadre de dispositifs hybrides, par le calcul du courant Josephson, ou l'on observe une compétition entre corrélations Kondo et supraconductivité.

## 4.6 INFORMATION QUANTIQUE

Les recherches sur l'information quantique ont continué à un rythme soutenu durant les dernières années. Après l'enthousiasme initié par l'invention d'algorithmes quantiques exponentiellement plus efficaces que les algorithmes classiques – enthousiasme tempéré par les difficultés de réalisation pratiques qui semblent considérables – l'activité s'est concentré d'une part sur une réflexion sur les fondements de l'informatique quantique (intrication, interférence), d'autre part sur les perspectives réalistes d'utilisation. Les obstacles principaux demeurent la rareté et le coût des ressources quantiques et la nécessité de les préserver des interactions avec l'environnement. Des recherches existent dans notre communauté sur ce sujet (q-bits Josephson protégés de la décohérence). Cela débouchera-t-il à moyen ou long terme sur un ordinateur quantique utilisable? La communauté reste partagée sur ce point, comme elle l'a toujours été, mais il ne fait guère de doute qu'il faille continuer l'effort entrepris, qui apporte une moisson de nouvelles idées et outils.

## 4.7 GAZ ATOMIQUES ULTRA-FROIDS

Depuis le début de la décennie, on a assisté à une explosion de résultats sur la physique statistique des gaz atomiques ultra-froids. Les études de physique statistique sur les gaz de bosons, de fermions, et tous les mélanges possibles, libres ou confinés dans

un réseau optique, seront certainement très actives dans les années à venir, en continuité avec l'activité récente : recherches de phases plus ou moins exotiques, détermination des équations d'état, transitions de phase quantique (comme la transition BKT récemment observée), effets d'appariement, gaz en forte interaction. La possibilité de changer la dimensionnalité du système et d'étudier par exemples des gaz de Tonks-Girardeau (à 1d) ou des excitations anyoniques (à 2d) ouvre aussi des perspectives déjà évoquées. Avec les gaz en interaction dipolaire à longue portée, c'est une nouvelle branche qui s'ouvre, avec des connections naturelles entre la physique de la matière condensée et le magnétisme quantique (glace de spins). Dans ce domaine, des développements méthodologiques importants ont été observés ces dernières années, bénéficiant en particulier d'idées issues de l'information quantique (méthodes de type DMRG). À moyen terme, ces recherches sur la dynamique quantique qui fédèrent une communauté assez transversale pourraient modifier durablement les outils théoriques disponibles. Au-delà de l'approximation de champ moyen encore (trop) souvent utilisée pour décrire les gaz atomiques ultra-froids, se pose toute la question des systèmes à petit nombre de corps en interaction. On sait aujourd'hui réaliser des micro-condensats avec quelques dizaines d'atomes. La compréhension de leurs propriétés dynamiques et du rôle des fluctuations quantiques est un enjeu intéressant.

Il existe des convergences transversales entre tous les sujets décrits dans ce résumé non exhaustif. Intrication, décohérence sont des concepts clés autour desquels peuvent émerger de nouvelles approches théoriques voire numériques. Les problèmes de dynamique et de la physique hors d'équilibre des systèmes de taille finie (injection d'électrons dans les jonctions, thermalisation et quenching au voisinage d'une transition de phase quantique des atomes froids) ne seront certainement pas complètement résolus durant les quatre années à venir mais on peut espérer que les défis qui sont ainsi posés conduiront à l'émergence d'outils conceptuels et numériques nouveaux.

## 5 – PHYSIQUE ET BIOLOGIE

La connaissance des phénomènes biologiques a énormément progressé au cours des dernières décennies, à la fois grâce aux progrès de la biologie moléculaire, de la manipulation de molécules et à ceux des techniques d'imagerie et d'enregistrement. Des données toujours plus nombreuses et diverses sont disponibles, que ce soit à l'échelle des molécules, des génomes, des cellules, des tissus et des organes ou même des individus et de leurs interactions. La physique joue un grand rôle dans l'acquisition même de ces données que ce soit par le développement de techniques de microscopie plus performantes, de nouveaux marqueurs fluorescents (nano-cristaux), ou de la manipulation des objets biologiques au niveau des molécules individuelles (pincettes optiques, magnétiques...), des cellules et des tissus (microfluidique, surfaces structurées...) ou des individus (internet, puces émettrices/capteurs de tailles réduites...). Nous décrirons cependant ici plus spécialement les domaines où la contribution des physiciens théoriciens nous paraît devoir être prépondérante, à savoir le traitement des données et surtout le développement de modèles conceptuels qui permettent de les interpréter et d'orienter leur collecte. En ce sens, l'interface physique-biologie est constituée d'aller-retours permanents entre les deux disciplines.

### 5.1 TRAITEMENT DES DONNÉES ET DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX ALGORITHMES

Le traitement des données expérimentales demande une méthodologie toujours plus technique, et les concepts sous-jacents se trouvent bien souvent dans la boîte à outils des physiciens. Les processus stochastiques sont par exemple indispensables à l'extraction d'information pertinente des données d'expériences en molécule unique. Le dévelop-

pement rapide des techniques de microscopie optique requiert un effort de modélisation de la diffusion et du transport dans divers milieux actifs, chargés ou très encombrés (membranes, cytoplasme, noyau). Les idées et méthodes de physique statistique se sont aussi révélées importantes pour analyser des problèmes difficiles d'optimisation combinatoire ou d'inférence statistique et pour proposer de nouveaux algorithmes performants. Leur mise en œuvre pour résoudre les multiples problèmes inverses qui se posent en biologie, où l'on désire souvent retrouver les interactions entre constituants à partir des observations (entre gènes à partir des concentrations mesurées de ARNm ou de protéines, entre neurones à partir d'enregistrements de leurs activités) paraît une voie prometteuse. Le traitement des données génomiques mérite une mention spéciale. Depuis le séquençage des premiers génomes et du génome humain, plus de 1 000 génomes d'espèces différentes ont été séquencés et bien plus sont en projet. Reconstituer l'histoire des espèces et des nouveautés évolutives est un défi théorique qui devrait attirer un nombre croissant de physiciens dans les années à venir.

## 5.2 INTERACTIONS MOLÉCULAIRES

Les modèles issus de la physique paraissent aussi appeler à jouer un rôle important à toutes les échelles. C'est naturellement le cas à l'échelle moléculaire où déterminer les conformations de molécules individuelles et spécialement celles des protéines est un problème important et difficile. Les nombreux travaux inspirés par la physique statistique des systèmes désordonnés ont clarifié différents aspects de la question mais de grands progrès restent à accomplir. De même, différentes questions d'interaction et de reconnaissance à l'échelle moléculaire comme celle concernant les protéines et l'ADN doivent être approfondies, pour obtenir des algorithmes prédictifs. La physique de la machinerie génétique est un objet d'étude en soi : les propriétés méca-

niques de l'ADN en interactions avec ses protéines partenaires (enzymes, histones), la dynamique du nucléosome, de la chromatine, l'organisation des gènes dans le noyau sont encore mal comprises.

## 5.3 PHYSIQUE DE LA CELLULE

À l'échelle supra-moléculaire, le fonctionnement des réseaux de régulation cellulaire est un sujet en plein développement. Le développement de modèles et des données nouvelles permettent d'aborder les questions du rôle des phénomènes stochastiques, des principes de l'architecture et du fonctionnement des réseaux génétiques, des bases de la différenciation cellulaire. L'organisation dynamique des différents organelles cellulaires est aussi un vaste sujet d'étude, de même que la régulation des processus de signalisation.

## 5.4 ASSEMBLÉES CELLULAIRES, MOUVEMENT COLLECTIF ET MORPHOGENÈSE

À l'échelle de la cellule ou d'une collection de cellules, les problèmes de forme, de motilité, de chimiotactisme sont d'une grande actualité et particulièrement importants pour la pathologie. C'est évidemment aussi vrai des interactions entre cellules qui régissent à la fois leur migration et l'architecture des ensembles cellulaires. Dans tous ces domaines, les contributions des physiciens théoriciens, qui mêlent modèles simples, à l'origine par exemple de comportement collectifs, et prise en compte de phénomènes de base (par ex. de la mécanique), sont importantes et paraissent appelées à le devenir encore plus.

Le développement et l'évolution des structures à l'échelle de l'organisme (embryogenèse, angiogenèse, croissance des tumeurs par exemple), plus généralement la morpho-

génèse, suscitent aussi l'intérêt des physiciens depuis longtemps. Les possibilités présentes et grandissantes de comparaison directe des modèles aux données expérimentales devraient permettre une extension considérable de ce domaine de recherche.

## 5.5 RÉSEAUX, PHYSIQUE STATISTIQUE ET SCIENCES HUMAINES

L'étude des réseaux de toutes sortes (réseaux génétiques, réseaux de protéines, mais aussi, internet et réseaux sociaux ou économiques) est aussi un sujet d'étude en évolution très rapide. L'analyse de leurs structures, de la manière dont ils se forment, de leur dynamique, de la façon dont ils traitent et transmettent l'information posent de nouvelles questions de physique statistique. Les modèles développés ont déjà un très grand impact dans l'ensemble de la communauté scientifique et cela paraît annonciateur de développements très intéressants dans ce domaine. L'interaction entre la physique et les sciences humaines n'en est encore qu'à ses débuts mais, que ce soit en «éconophysique», pour la propagation des épidémies ou la formation des opinions, elle paraît fructueuse et promise à un bel avenir.

## 5.6 NEUROSCIENCES COMPUTATIONNELLES

Les neurosciences computationnelles méritent enfin d'être traitées séparément pour plusieurs raisons. C'est, d'une part, le domaine de la biologie où la nécessité d'une approche théorique se fait sans doute le plus cruellement sentir. C'est, d'autre part, un domaine où les contributions des physiciens théoriciens sont essentielles depuis plus d'une vingtaine d'années que ce soit par le développement de modèles de mémoire associative, d'apprentis-

sage, de traitement de l'information où bien encore par l'analyse de différents phénomènes dynamiques (oscillations, états d'activité haut ou bas, plasticité synaptique à court et long terme...). En conséquence, de nombreux centres mondialement reconnus de neurosciences computationnelles sont dirigés par des physiciens théoriciens (avec même plusieurs laboratoires de «neurophysique»). Certainement, ce mouvement, fruit de la nécessité et de l'intérêt du sujet ne devrait que s'amplifier.

En conclusion, l'organisation du vivant, son évolution au cours des quatre derniers milliards d'années, le traitement de l'information par les êtres vivants et spécialement le cerveau humain sont certainement parmi les plus grandes questions scientifiques du *xxi*<sup>e</sup> siècle. Elles ne peuvent être résolues avec succès que par les efforts conjoints de disciplines diverses parmi lesquelles la physique théorique à un rôle essentiel à jouer.

## CONCLUSION

*Le CNRS a été séparé en dix Instituts. Les recherches développées par les membres de la section 02, étant très fortement influencées par les interactions avec les mathématiciens, les expérimentateurs en physique subatomique, les mécaniciens des fluides, les géophysiciens, les astrophysiciens, ou encore les biologistes, il est important qu'une attention toute particulière soit apportée aux liens de l'institut de Physique avec les autres Instituts. La direction du CNRS doit être particulièrement vigilante à la question des interfaces. Dans les laboratoires mixtes, dépendant de plusieurs instituts, la vie scientifique ne doit pas souffrir des difficultés inhérentes aux relations complexes entre instituts.*

*Pour ce qui concerne les recrutements, la section reconnaît l'importance et l'utilité des commissions interdisciplinaires, mais s'inquiète également des effets d'accordéon liés à leur création et leur suppression et au fait que ces structures, assez lourdes, ne permettent pas*

facilement d'embaucher des chercheurs travaillant dans des domaines peu représentés en France. En conséquence, la section encourage le CNRS à réfléchir, dans des domaines disciplinaires qui ne relèvent pas d'une section unique, à des procédures qui faciliteraient le recrutement de candidats ayant un profil interdisciplinaire et qui seraient plus légères que celles liées aux commissions interdisciplinaires.

Les GDR ont un rôle essentiel pour structurer les relations entre communautés et faire émerger de nouvelles thématiques. Ils sont peu coûteux pour le CNRS et doivent être préservés.

Depuis cinq ans, les financements ANR influent fortement sur la politique scientifique des laboratoires et les directions de recherches encouragées. Il est fondamental de conserver une place très importante aux projets blancs, y compris dans des thématiques émergentes et pour de petites équipes.

La section s'inquiète de la tendance actuelle au formatage prétendument objectif des critères d'évaluation (bibliométrie...), qui a des effets pervers sur la façon de travailler de la communauté scientifique.

Les échanges avec les chercheurs étrangers sont une source de dynamisme et d'innovation. Dans cette optique il est crucial de disposer d'un nombre suffisant de postes d'accueil adaptés au marché international. En particulier, la durée minimale d'un post-doctorat efficace est de deux ans. Nous souhaitons que le CNRS ait une politique ambitieuse en la matière.

Nous souhaitons également parler ici des liens entre le CNRS et les Universités, qui sont essentiels au bon fonctionnement de notre communauté, par l'implication notamment des enseignants-chercheurs. Ces derniers ont un triple métier : enseignants et chercheurs, ils doivent également assurer de nombreuses responsabilités d'intérêt collectif, aussi bien au niveau local que national. Les conditions de travail qui leurs sont offertes aujourd'hui ne leur permettent que difficilement de rester compétitifs sur la scène internationale. Dans ces conditions, de nouveaux mécanismes de

décharge régulière d'enseignement doivent être favorisés pour compléter ceux qui existent actuellement. Les délégations au CNRS restent un outil incontournable qu'il s'agit de mettre en corrélation avec la pression des demandes et d'étendre systématiquement aux enseignants-chercheurs qui s'impliquent à l'échelon national, en particulier ceux qui siègent au Comité National.

Par ailleurs, nous pensons que le CNRS et les Universités pourraient réfléchir à la mise en place de nouveaux mécanismes rendus possibles ces dernières années par la loi LRU. Favoriser les échanges d'enseignement entre chercheurs et enseignants-chercheurs dans une juste reconnaissance de l'ensemble des tâches de recherche et d'enseignement semble être une approche, trop rarement utilisée actuellement, qui devrait in fine être bénéfique à l'ensemble de la communauté. Les contrats ANR permettent des décharges d'enseignement dont la mise en œuvre doit être facilitée et encouragée. Enfin, concernant les chaires Universités/Organismes, nous pensons qu'un approfondissement des réflexions autour du système actuel et des aménagements seraient nécessaires.

Les ITA des unités dépendant de la section 02 ont vu leurs tâches devenir d'années en années plus complexes et leurs charges s'accroître. La diversité des contrats (ANR, programmes européens...), leur hétérogénéité et leur complexité ont renforcé les besoins en gestion. Il en est de même pour les postes d'informaticiens avec l'évolution incessante des outils. L'augmentation des contrats précaires, le non renouvellement des postes pérennes entraînent une perte massive des savoir-faire et compétences au sein des laboratoires. C'est une baisse d'efficacité et un coût trop élevé que ne peut se permettre le monde de la Recherche. Un renforcement des effectifs des ingénieurs et techniciens et administratif de haute technicité est nécessaire : une reconnaissance et une validation des acquis de l'expérience est indispensable pour motiver et stabiliser les ITA très compétents dont la recherche a un besoin essentiel.

# 03

---

## INTERACTIONS, PARTICULES, NOYAUX DU LABORATOIRE AU COSMOS

### *Président*

Konstantin PROTASSOV

### *Membres de la section*

Patrick AURENCHE

Christophe BEIGBEDER BEAU

Vincent BRETON

Marie-Claude COUSINOU

Jean-Marie DE CONTO

Emmanuel GAMELIN

Jérôme GIOVINAZZO

Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC

Jean-Yves GROSSIORD

Francesca GULMINELLI

Sonja KABANA

Santiago PITA

Éric PLAGNOL

Thierry PRADIER

Melissa RIDEL

Marc ROUSSEAU

Marie-Hélène SCHUNE

Michel TRIPON

Marc WINTER

Fabian ZOMER

Les objectifs de la physique subatomique sont de trouver les briques les plus élémentaires de la Nature, d'étudier leurs propriétés et de comprendre la façon avec laquelle elles forment la matière et font évoluer l'Univers. La recherche des constituants élémentaires et l'étude de leurs propriétés et de leurs origines correspondent aux champs d'investigation des physiques des particules et des astroparticules. La structuration de la matière à l'échelle microscopique fait partie des interrogations de la physique nucléaire et de la physique hadronique et, à l'échelle de l'Univers, de celles de l'astrophysique nucléaire et de la cosmologie.

En outre, la physique subatomique a toujours eu un très fort impact sur la société : elle a conduit à la découverte d'un nouveau type d'énergie, l'énergie nucléaire, et des recherches ont été entreprises sur les conditions sécurisées dans lesquelles cette énergie peut être contrôlée et utilisée. Elle continue à apporter des réponses aux problèmes sociétaux dans un spectre très large allant de la physique médicale jusqu'aux développements indirects comme le *World Wide Web* qui fut inventé au Cern pour la communauté internationale des physiciens des particules, et qui a complètement bouleversé la société moderne.

# 1 – L'ORGANISATION DE LA MATIÈRE EN INTERACTION FORTE

La physique nucléaire cherche à comprendre l'organisation des nucléons dans les noyaux atomiques, ainsi que des quarks et des gluons dans les nucléons. Elle est une composante essentielle de l'étude des systèmes complexes quantiques. À ce titre, elle est riche en phénomènes communs à d'autres disciplines : petits systèmes, condensats de Bose superfluides et supraconducteurs, transitions de phases, phénomènes critiques, etc.

## 1.1 DES NOYAUX ET DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE COMPOSÉS DE PARTICULES

Le noyau atomique est un système quantique régi par les interactions forte, faible et électromagnétique, à l'origine d'une grande variété de phénomènes complexes. Le but de la physique nucléaire est d'aboutir à une compréhension globale et cohérente de ces différents phénomènes, des propriétés collectives aux excitations, des systèmes nucléaires à très petit nombre de corps à la matière étendue, en passant par la compréhension et le contrôle des réactions nucléaires. Cet objectif n'est pas seulement nécessaire à la compréhension du comportement de la matière hadronique qui nous entoure, mais il a aussi des implications essentielles sur nombre d'applications technologiques d'intérêt sociétal, de la production d'énergie au retraitement des déchets, de l'imagerie à l'hadron-thérapie.

Les physiciens français se sont dotés d'outils très performants pour cette exploration, combinant faisceaux d'ions stables et radioactifs, spectromètres et ensembles de détection qui leur permettent d'être au plus haut niveau de la compétition internationale. Ils exploitent les installations françaises (Ganil,

Spiral, Alto), mais aussi internationales telles qu'Isolde au Cern, JYFL à Jyväskylä, FLNR à Dubna, LNL à Legnaro, GSI à Darmstadt ainsi que MSU aux USA et RIKEN à Osaka.

Actuellement, l'une des questions de base dans ce domaine concerne les limites d'existence du noyau atomique, c'est-à-dire l'identification des isotopes les plus asymétriques en proportion relative de protons et de neutrons (*drip lines*), et l'étude de leur structure. Des variations brusques d'énergie de liaison se retrouvent dans la structure en couches, en correspondance de nombres de nucléons spécifiques : les nombres magiques. Récemment, une variation des nombres magiques en s'éloignant de la vallée de stabilité a été mise en évidence. Des physiciens français ont par exemple montré que le caractère magique du nombre de neutrons  $N=20$  disparaît dans le noyau très riche en neutron  $^{32}\text{Mg}$ . Ces découvertes remettent en question l'un des paradigmes les plus solides de la structure nucléaire, à savoir l'universalité des nombres magiques.

La compréhension microscopique de ces nouveaux phénomènes nécessite une exploration complète de la table des isotopes, des hydrogènes aux noyaux super-lourds.

Le domaine des noyaux légers constitue un champ d'étude d'élection afin de connecter les degrés de liberté sub-nucléoniques avec la structure des noyaux complexes, connexion qui commence à pouvoir être quantitative avec les théories modernes *ab initio*. Du point de vue expérimental, la disponibilité d'accélérateurs d'ions radioactifs de première génération a permis l'étude des propriétés des noyaux légers très faiblement liés ou non-liés à proximité des *drip lines* ( $^7\text{H}$ ,  $^9\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{O}$ ) à l'aide de réactions directes en cinématique inverse. Les équipes françaises sont pionnières dans ce domaine.

L'extension de l'exploration des *drip lines* vers des noyaux plus lourds n'est pas seulement un enjeu expérimental, mais demande aussi de considérables progrès théoriques. En effet, la compréhension des états peu liés requiert une modélisation correcte du continuum, ce qui implique une description cohé-

rente des états de diffusion, des résonances et des états liés dans un même formalisme en termes de système quantique ouvert. Les physiciens français contribuent de façon importante à l'avancée de ce programme.

Si la *drip line* proton est relativement mieux connue que la *drip line* neutron, son étude est néanmoins particulièrement intéressante parce que des radioactivités exotiques ont été mises en évidence à proximité de la ligne  $N = Z$ , et que ces noyaux permettent d'extraire des informations sur l'appariement proton-neutron, encore largement inconnu. Les physiciens français fournissent une contribution essentielle à cette thématique, du point de vue expérimental comme théorique.

Les noyaux lourds montrent quant à eux une grande variété de phénomènes collectifs, qui ne s'expliquent pas de façon satisfaisante par des méthodes microscopiques de type modèle en couches, lesquels mettent plutôt en exergue les propriétés de particules indépendantes du noyau. L'approche fondée sur l'utilisation de fonctionnelles de densité fournit une description des états fondamentaux et excités, ainsi que des mécanismes de réaction, avec un pouvoir prédictif inégalé sur la table des nucléides tout entière. L'enjeu actuel, dans lequel les physiciens français sont en première ligne, consiste en la construction de fonctionnelles fiables pour les noyaux exotiques et fondées sur des interactions effectives dérivées avec des approches du groupe de renormalisation.

La réponse collective du noyau révèle des informations importantes sur cette interaction effective, et par conséquent sur les propriétés de la matière nucléaire, telle qu'elle pourrait se trouver au cœur des astres compacts. Si la réponse des noyaux stables est dominée par les résonances géantes de différentes multipolarités, une réponse dipolaire additionnelle a été observée, pour des noyaux riches en neutrons, et située à basse énergie d'excitation à proximité du seuil d'émission de particule. Cette « résonance dipolaire pygmée » a été attribuée à un nouveau mode d'excitation lié à l'asymétrie d'isospin et interprétée comme une vibration d'un halo de neutrons autour

d'un cœur saturé en isospin. Plus généralement, la partie isovectorielle de la fonctionnelle (énergie de symétrie) est encore très peu connue et peut être contrainte par des expériences de diffusion d'isospin, étudiées actuellement par les physiciens français et leurs collègues américains.

Les investigations des propriétés collectives en fonction du spin et de la température jouent un rôle crucial dans la compréhension de la structure nucléaire au-delà du champ moyen. Les expériences passées montrent que les noyaux peuvent subir plusieurs transitions de forme à très hauts moments angulaires, et une transition de type liquide-gaz à haute température. Les physiciens français ont fourni des contributions cruciales à ces études, qui doivent être poursuivies dans le domaine des noyaux exotiques.

Aux limites extrêmes d'existence du noyau atomique, des effets fins de structure nucléaire sont à l'origine de la prédiction de l'existence d'éléments super-lourds, stabilisés contre la fission spontanée par des effets combinés de déformation et de fermeture de couche. Un programme de recherche a été conduit conjointement à JYFL, GSI, Dubna et Ganil pour étudier les noyaux autour du  $^{254}\text{No}$ , à proximité de la fermeture de couche déformée  $N = 152$ . Il s'agit ici des systèmes les plus lourds pour lesquels il est possible d'effectuer une spectroscopie détaillée, et des faisceaux stables de haute intensité dédiés sont nécessaires pour avancer ce programme.

Toutes ces études ont de nombreuses applications. En astrophysique, elles sont diverses et particulièrement importantes. On peut citer la nucléosynthèse des éléments légers et lourds, la physique des explosions stellaires (supernovae), la nature des objets compacts comme les étoiles à neutrons, les réactions induites par les neutrinos. Les ingrédients nucléaires introduits dans les modèles astrophysiques nécessitent la connaissance détaillée des propriétés de nombreux noyaux situés à la *drip line* neutron, ainsi que des processus d'interaction forte et électrofaible qui jouent un rôle fondamental dans l'évolution des objets stellaires. La précision des mesures

expérimentales et des prédictions théoriques est alors cruciale, en ce qui concerne les masses nucléaires, les modes d'excitation, les densités de niveaux, les décroissances  $\alpha$  et  $\beta$ , les probabilités de fission, les captures électroniques et de neutrinos.

Ces recherches ambitieuses nécessitent la disponibilité complémentaire de faisceaux d'ions radioactifs et d'ions stables de haute intensité. Une moisson de nouveaux résultats a déjà été récoltée dans les dernières années grâce aux installations d'ions radioactifs de première génération, en particulier Spiral au Ganil. Les physiciens français sont actuellement investis dans l'amélioration de Spiral et la construction de la nouvelle installation Spiral2, qui permettra d'étendre ces études en fournissant entre autres des faisceaux intenses de fragments de fission riches en neutrons à basse énergie (Desir) ou ré-accélérés à des énergies de l'ordre de 10 AMeV, ainsi que dans l'instrumentation associée. Plusieurs détecteurs et spectromètres de nouvelle génération sont en phase de construction (Agata, S3) ou de R&D (Gaspard, Paris, Fazia, Actar...). Les physiciens français sont aussi impliqués dans la réalisation de l'installation de nouvelle génération Fair auprès du GSI, et à plus long terme dans la construction du projet complémentaire Eurisol. Un travail important de R&D autour des faisceaux d'ions radioactifs est également mené auprès d'Alto.

La finalisation de ces projets, et l'exploitation de la physique qui en découlera, ne pourra pas être menée avec succès sans un soutien constant de théoriciens qui, en physique nucléaire, sont particulièrement proches des expériences et contribuent de façon importante à définir des objectifs pour les nouveaux projets.

Cette recherche n'est pas limitée à l'échelle française ni européenne, et de nombreux projets sont en cours de réalisation de par le monde (RI@RIKEN, ISAC2, FRIA).

## 1.2 DES PARTICULES COMPOSÉES DE QUARKS ET DE GLUONS

Les nucléons sont au premier ordre composé de trois quarks, mais de nombreuses questions se posent, dès qu'on les étudie à plus petite échelle. Quelles sont leurs distributions de charge? Quel est le rôle des gluons? Des quarks étranges participent-ils à leurs structures? Quelle est l'origine de leurs moments magnétiques? L'environnement des noyaux influe-t-il sur leurs propriétés? Pourquoi le nucléon présente-t-il moins de modes d'excitation que la théorie n'en prédit? Existe-t-il des formes exotiques de matière hadronique?

Pour aborder ces questions, les nucléons sont sondés avec des hadrons (GSI à Darmstadt) ou des leptons (JLab aux USA, Mami à Mayence). Trois thèmes ont mobilisé ces dernières années les équipes françaises: mesure du contenu en quark étrange du nucléon, étude des distributions de partons généralisées (GPD), et caractérisation des effets du milieu nucléaire sur les propriétés des mésons (masse, durée de vie). Les prises de données sur l'asymétrie due à la violation de la parité en diffusion élastique électron-proton à JLab se sont terminées en 2008. Les résultats montrent une contribution pratiquement nulle des quarks étranges aux propriétés électriques du proton, comme observé également à Mami. En revanche, cette contribution semble atteindre quelques pourcents pour les propriétés magnétiques à grand transfert d'impulsion. Une série de mesures pionnières d'électro-production de photons (diffusion Compton virtuelle) et de mésons sur le nucléon, permettant en principe d'accéder aux GPDs, ont été entreprises ces dernières années à JLab et ont mené à plusieurs publications qui apportent les premières contraintes sur la modélisation et l'extraction des GPDs. L'expérience Hades au GSI, pour l'étude de la modification éventuelle des propriétés des hadrons dans la matière, est en phase de production de données et les premiers résultats sur les systèmes les plus légers sont déjà publiés. Après la modification du détecteur, les systèmes plus lourds seront

étudiés (fin 2010) et des expériences avec faisceaux de pions seront réalisées (2011).

À moyen et long termes, les physiciens du CNRS ont décidé de se concentrer sur deux projets d'étude de la structure du nucléon : étude des GPDs à une énergie incidente plus élevée (12 GeV) à JLab (à partir de 2013), et l'expérience Panda prévue auprès du nouvel accélérateur Fair qui entrera en service à partir de 2017 en Allemagne. Un groupe français y propose un programme de mesure des facteurs de forme électromagnétiques du nucléon du genre temps en utilisant un faisceau d'antiprotons. Des contributions techniques très significatives sont prévues et concerneront soit de nouveaux détecteurs (Panda) soit des améliorations majeures prévues sur les machines existantes (JLab).

### 1.3 UNE MATIÈRE DE QUARKS ET DE GLUONS DÉCONFINÉS

Les partons, constituants élémentaires des hadrons, n'ont jamais pu être observés à l'état libre. Ils restent ainsi confinés pour former les hadrons (voir 1.2). Néanmoins, lorsqu'entrent en collision des noyaux lourds à très haute énergie, une transition vers un état où quarks et gluons sont déconfinés doit avoir lieu. Ce « plasma de quarks et de gluons » prévalait dans l'Univers quelques microsecondes après le Big-Bang et peut être décrit dans un cadre thermodynamique par une équation d'état incluant température, énergie, pression, densité, composition, etc.

Les équipes françaises, issues des deux communautés de physique nucléaire et de physique des particules, ont eu un rôle majeur dans l'observation au SPS du Cern de premiers indices (comme la suppression du méson  $J/\psi$  par effet d'écrantage) montrant qu'un nouvel état de la matière a bien été produit. L'existence de cet état a été confirmée, à plus haute énergie et par de nombreuses signatures (comme l'absorption des *jets* par le milieu formé), au RHIC de Brookhaven, USA. L'en-

semble des résultats du RHIC – une quinzaine de physiciens du CNRS ont participé activement aux expériences Brahms, Star ou Phenix – indique la production d'un état liquide de quarks et de gluons en interaction, différent du gaz parfait prédit et attendu.

Les énergies plus élevées (presque 30 fois celles du RHIC) mises en jeu dans les collisions d'ions lourds au LHC du Cern, qui débiteront fin 2010, permettront d'étendre ce domaine d'étude à des densités d'énergie toujours plus extrêmes. Il s'agira non seulement de confirmer la création d'un plasma mais surtout d'étudier quantitativement ses propriétés thermodynamiques. Ces travaux conduisent à relever de nombreux défis, techniques par la complexité des réactions produisant jusqu'à plusieurs milliers de particules dont il faut mesurer les caractéristiques simultanément, et théoriques par la diversité et l'addition des processus mis en jeu.

Dans ce domaine, la majeure partie de la communauté française est rassemblée aujourd'hui autour du LHC. Ce sont d'abord une cinquantaine de physiciens exploitant le détecteur Alice, un instrument optimisé pour couvrir l'ensemble des questions posées par cette physique. Cette communauté a une bonne visibilité grâce à ses contributions importantes aux niveaux détection, traitement des données et implications dans les thèmes de physique étudiés, qui sont la physique des muons, des particules étranges, des photons.

Un petit groupe s'implique depuis peu dans cette recherche sur le détecteur CMS, et a également acquis une bonne visibilité.

Parallèlement à ces études de longue haleine, s'amorcent des réflexions sur la modification de quelques dispositifs d'Alice afin d'améliorer leurs performances et de les rendre compatibles avec les caractéristiques du LHC lorsque, autour de 2015, les intensités de ses faisceaux seront accrues.

## 1.4 PHYSIQUE DES PARTICULES

La physique des particules s'attache à l'étude des interactions entre constituants fondamentaux de la matière, à la compréhension de l'origine de leur masse, et enfin aux symétries discrètes d'espace et de temps. Elle tisse des liens entre l'observation au niveau microscopique et la compréhension de l'Univers, en recherchant des particules susceptibles de constituer la matière noire.

Les avancées parallèles et couplées des observations expérimentales et des progrès théoriques enregistrés depuis les années 60 ont permis l'élaboration de ce qui est appelé le « modèle standard ». Il s'agit d'une théorie quantique des champs, traitant dans un cadre formel unifié trois interactions fondamentales : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte. Dans ce modèle, les particules élémentaires se classent en particules dites de matière, les fermions, et en particules médiatrices des forces, les bosons. Il y a trois familles de particules de matière, chaque famille comprenant deux quarks, les composants essentiels des hadrons et des nucléons, et deux leptons, un chargé et son neutrino associé. Pour chaque particule de matière, il existe également une antiparticule. Seule la première famille constitue la matière stable et suffit au premier ordre à la description de notre environnement. Les particules des deux autres familles ne peuvent être créées, et donc observées, que lors de collisions, dans l'Univers ou les accélérateurs de particules. Les interactions fondamentales (forte, faible, électromagnétique) sont véhiculées par des bosons dits intermédiaires (gluons, W et Z faibles, photon). Finalement, le modèle standard comprend un boson supplémentaire, non encore observé, le boson de Higgs qui est à l'origine des masses des particules. Bien que ce modèle donne une description très satisfaisante des phénomènes observés dans les expériences, il reste toutefois une théorie incomplète :

- il ne justifie pas l'existence de trois familles ;

- il ne permet pas de prédire les valeurs observées des masses des particules ;
- il ne rend pas compte de la gravitation ;
- il n'explique pas l'asymétrie entre matière et antimatière observée dans l'Univers.

Pour répondre à ces questions, de nombreuses théories permettant d'aller « au-delà du modèle standard » sont développées. En général, elles prédisent l'existence de nouvelles particules ainsi que des déviations fines dans les mesures de certaines observables par rapport aux prédictions du modèle standard. Cette « nouvelle physique » devrait apparaître vers une énergie de l'ordre du TeV. La recherche de nouvelles particules qui pourraient constituer la masse manquante dans l'univers se fait auprès des accélérateurs ainsi que dans les observations d'astrophysique et de cosmologie (voir § 3).

Le modèle standard a été profondément testé, tout particulièrement au cours des deux dernières décennies. Les expériences menées auprès du LEP (Cern, Genève) mais aussi de Hera (Desy, Allemagne) ont permis de vérifier sa cohérence interne et de mesurer de nombre de ses paramètres avec une très grande précision et beaucoup de redondance. Ces tests du modèle standard se prolongent actuellement par certaines des mesures menées auprès du Tevatron (Fermilab, USA) et continueront au LHC (Cern, Genève). Le dernier ingrédient du modèle standard n'ayant à l'heure actuelle pas reçu de confirmation expérimentale est le mécanisme donnant leur masse aux particules élémentaires. Il devrait se traduire par l'existence d'un boson de Higgs dont la signature expérimentale est actuellement activement recherchée. D'autre part, la recherche de signaux de physique au-delà du modèle standard est un des buts principaux de la recherche en physique des particules pour les prochaines années.

Mais augmenter l'énergie disponible de manière à produire et observer de nouvelles particules n'est pas la seule façon de chercher des signaux de nouvelle physique. La signature de l'existence de nouvelles particules peut prendre la forme d'effets quantiques dans des

processus n'impliquant dans l'état final que des particules du modèle standard. Pour ce type de recherche, dites indirectes, le seuil de production en énergie n'est pas l'enjeu principal. La diminution des effets quantiques avec l'augmentation de la masse des particules virtuelles entraîne la nécessité d'une très grande précision. Les expériences de précisions auxquelles participent les physiciens français se déroulent auprès des collisionneurs mais on peut également mentionner les expériences auprès des sources des neutrons ultra froids en France (ILL) et à l'étranger (PSI, Suisse) qui cherchent le moment électrique dipolaire du neutron ou étudient ses états quantiques dans le champ de pesanteur.

D'un point de vue expérimental, l'évolution de la physique des particules ces dernières années se caractérise par des dispositifs expérimentaux moins nombreux, mais plus complexes, rassemblant un nombre croissant de physiciens et d'ingénieurs. Avant leur construction, les détecteurs font l'objet de R&D mettant en œuvre des techniques de pointe en électronique, en informatique, et sur les matériaux utilisés. Entre les premières idées et la période de prise de données, une période d'au moins une dizaine d'années devient ainsi nécessaire.

## 1.5 MESURES À HAUTE ÉNERGIE

Le LHC n'a produit ses premières collisions à haute énergie qu'à la fin de 2009 et jusque là, le Tevatron était le collisionneur le plus puissant au monde. Une luminosité intégrée d'environ  $7 \text{ fb}^{-1}$  y a été accumulée par les expériences CDF et DØ. L'IN2P3 et le CEA-IRFU contribuent de manière importante à l'expérience DØ et à un moindre degré à l'expérience CDF. Au-delà de la recherche du boson de Higgs, le champ de mesures au Tevatron comprend la détermination précise de paramètres fondamentaux du modèle standard tels que la masse du boson W et celle du quark top. Ces mesures permettront d'affiner les contraintes sur la masse du boson de Higgs du modèle standard, ou de vérifier la cohé-

rence de ce modèle une fois cette masse mesurée. Enfin, toute manifestation de nouvelle physique au-delà du modèle standard est et sera encore naturellement et activement recherchée auprès de l'accélérateur fournissant la plus haute statistique disponible à ce jour.

La mise en service du LHC couronne finalement près de vingt ans de R&D et de production de détecteurs, auxquelles les équipes de l'IN2P3 ont largement participé. Deux expériences auprès du LHC, Atlas et CMS sur lesquelles les ingénieurs et physiciens de l'IN2P3 et du CEA-IRFU travaillent, s'orientent principalement vers la mise en évidence du boson de Higgs et la recherche de nouvelle physique. En 2009, après des centaines de milliers de collisions à l'énergie d'injection (900 GeV), des collisions à une énergie de 2,36 TeV ont été enregistrées par les quatre expériences (Alice, Atlas, CMS et LHCb). Ces premières données sont activement utilisées pour la compréhension des détecteurs. Cette période se poursuit en 2010 avec une énergie de 7 TeV et une augmentation graduelle de la luminosité. Tenant compte de la complexité des systèmes mis en jeu, ceci constitue une étape déterminante pour la qualité des résultats futurs. En parallèle avec l'alignement et l'étalonnage des appareillages, les caractéristiques des collisions enregistrées pour la première fois à cette énergie seront étudiées attentivement afin de parfaire les simulations. Au cours de l'année 2010, les expériences espèrent enregistrer environ  $200 \text{ pb}^{-1}$ , ce qui ouvrira la porte aux premières analyses. Des événements contenant des bosons W et Z commencent déjà à être enregistrés et fourniront des muons, des électrons et des jets de particules qui permettront de caractériser les différentes échelles d'énergie (visible et manquante) et d'étudier l'uniformité des réponses des détecteurs. Lorsque la luminosité sera de  $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  une statistique d'environ  $10 \text{ fb}^{-1}$  sera accumulée par an et devrait donner accès aux premières découvertes : celle du boson de Higgs tel qu'il est prédit par le modèle standard mais aussi les premières signatures possibles d'une nouvelle physique. L'amélioration progressive des performances de l'accélérateur en termes de luminosité et de stabilité, donnera ensuite accès à des études de plus grande précision.

À plus long terme, quand le LHC aura produit ses premiers résultats et donné éventuellement des indications sur la présence de nouvelle physique, la construction d'un collisionneur linéaire électron-positron est envisagée : l'ILC dont l'énergie ira du pic du Z (90 GeV) jusqu'au TeV. Un autre projet, le CLIC, pourrait permettre d'étendre le domaine d'énergie de collision au-delà du TeV. Des ingénieurs et des chercheurs de l'IN2P3 et du CEA-IRFU se sont impliqués dans les développements nécessaires à l'ILC, en collaboration avec des industriels mais aussi dans les études sur les techniques novatrices d'accélération, telles que CLIC. Les expériences prévues auprès de ces accélérateurs bénéficieront d'une connaissance particulièrement précise de l'état initial des collisions, d'une grande souplesse d'ajustement de l'énergie et de la polarisation des faisceaux, ainsi que d'un bruit de fond ne perturbant que modérément les processus étudiés. Elles permettront à la fois d'étudier en détail les phénomènes nouveaux révélés par le LHC, mais aussi d'étendre la sensibilité expérimentale à des processus de physique nouvelle qui n'y sont guère accessibles. Une collaboration mondiale a été mise en place pour organiser et diriger le travail sur l'ILC. Ce groupe doit produire vers la fin 2012 deux *Technical Design Reports*, un pour l'accélérateur et un pour le détecteur. Ils seront utilisés pour les décisions concernant le futur du projet.

## 1.6 PHYSIQUE DE LA SAVEUR : LES QUARKS

La physique des saveurs est un des meilleurs candidats pour la recherche indirecte des signes de physique au-delà du modèle standard. En effet, plusieurs phénomènes tels que les courants neutres changeant la saveur, ou la violation de la symétrie CP (produit des symétries de parité et de conjugaison de charge) apparaissent via des effets quantiques d'ordre supérieur et sont potentiellement sujet à des contributions dues à la nouvelle physique.

Ces mesures de haute précision se font auprès d'accélérateurs fournissant un grand nombre d'événements. Elles ont lieu actuellement au Tevatron et auprès des usines à B, et dans le futur proche au LHC.

La violation de la symétrie CP est un des ingrédients majeurs de la baryogénèse. Aujourd'hui, nous savons que la violation de CP du modèle standard n'est pas suffisante pour décrire l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. Une explication pourrait être l'existence d'autres sources de violation de CP. Il faut donc chercher une faille dans la description des phénomènes liés à la violation de la symétrie de CP dans le modèle standard dans lequel les états propres de saveur sont reliés aux états propres de masse par une matrice unitaire : la matrice CKM. Plusieurs quantités, qui dépendent des paramètres de cette matrice, peuvent être mesurées et, si le modèle standard est correct, elles doivent donner des valeurs compatibles. L'étude du méson  $B_s$  a déjà fourni des contraintes significatives sur les extensions envisageables du modèle standard. L'étude de ce méson se poursuivra auprès du LHC en particulier avec l'expérience LHCb à laquelle participent des ingénieurs et physiciens de l'IN2P3.

Les autres mésons B ont été étudiés très en détail auprès des « usines » qui les produisent en grand nombre (environ 2,5 milliards de mésons B ont été produits). Des ingénieurs et physiciens de l'IN2P3 et du CEA-IRFU participent à l'expérience Babar à Slac en Californie. La violation de CP dans les mésons B a été mise en évidence pour la première fois en 2001 et les mesures sont maintenant de grande précision. Ces multiples mesures seront poursuivies par l'expérience LHCb dès 2010. Dans le futur, un collisionneur électron-positron à très haute luminosité permettra aussi de poursuivre ces mesures de précision et un TDR sera écrit en 2010.

## 1.7 PHYSIQUE DE LA SAVEUR : LES NEUTRINOS

La découverte récente des oscillations de neutrinos montre qu'ils ont une masse qui les distingue et qui permet de les mélanger. Comme pour les quarks, le mélange des familles est décrit par une matrice unitaire dont deux des quatre paramètres sont relativement bien mesurés. Seule une limite supérieure est connue pour le troisième (l'angle  $\theta_{13}$ ) et il est très important de le mesurer, d'autant qu'il est associé à une violation de CP. De plus, si les oscillations établissent une hiérarchie de masse entre les neutrinos, elles ne donnent pas d'indication sur leur échelle absolue ni sur la nature des neutrinos (Dirac ou Majorana). Toutes ces questions font l'objet de plusieurs expériences.

La collaboration T2K (à laquelle trois laboratoires de l'IN2P3 participent) utilise des neutrinos produits grâce à l'accélérateur JParc (Japon) et dirigés vers le détecteur Super-Kamiokande, situé à plus de 130 km de distance. À la fin de l'année 2009, le détecteur proche (INGRID, situé à 280 m de l'accélérateur) a détecté ses premiers neutrinos. Une première estimation de  $\theta_{13}$  est prévue pour 2015. Parallèlement, la collaboration Double Chooz (à laquelle trois laboratoires de l'IN2P3 participent) se propose de mesurer cet angle en détectant le flux de neutrinos en provenance de la centrale nucléaire de Chooz, à la fois grâce à une station proche et à une station distante (d'environ 1 km). Cette dernière est prévue de fonctionner à la fin 2010 et la station proche en 2012. À plus long terme, des projets de type mégatonne sont en gestation.

Un faisceau de neutrinos pointe du CERN en direction du laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie), pour rechercher l'apparition de neutrinos-tau à 730 km d'une source de neutrinos-mu. Le détecteur Opera, complété mi-2008, y acquiert des données depuis cette date. L'analyse des données 2008-2009 est en cours et la première régénération d'un neutrino-tau a été mise en évidence en mai 2010. Les laboratoires français ont une contribution essentielle aux

détecteurs à scintillation, à la manipulation des cibles, à l'acquisition et à l'analyse des données. L'expérience Opera continuera à prendre des données jusqu'en 2012 pour démontrer sans ambiguïté le changement direct de saveur de neutrino-mu en neutrino-tau et tenter de contraindre l'angle  $\theta_{13}$ .

Enfin, la collaboration Nemo3 étudie les propriétés du neutrino (nature et masse) au travers de la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino  $\beta\beta(0\nu)$ . Le détecteur (en fonctionnement depuis 2003) est unique par sa capacité à identifier les électrons émis dans la double désintégration bêta et à mesurer leur distribution angulaire qui pourrait permettre de déterminer le processus conduisant à la désintégration  $\beta\beta(0\nu)$  si celle-ci était découverte. À ce jour, cette collaboration a atteint une limite inférieure sur le temps de vie de ce processus d'environ  $10^{24}$  ans, au meilleur niveau mondial. L'objectif du projet SuperNemo qui reprend les principes de détection de Nemo3 est d'atteindre une sensibilité de  $10^{26}$  ans sur la période de la désintégration  $\beta\beta(0\nu)$  correspondant à une masse effective du neutrino de 50 à 100 meV. Le premier démonstrateur est prévu pour 2012 et l'ensemble de l'expérience pourrait être en fonctionnement en 2014.

## 2 – ASTROPARTICULE, ASTROPHYSIQUE DE HAUTE ÉNERGIE ET COSMOLOGIE

L'Univers est devenu un laboratoire incontournable pour l'étude de la physique au delà du modèle standard. La mesure du rayonnement diffus cosmologique et l'analyse de la luminosité des supernovae ont montré que l'univers serait euclidien et que son expansion s'accélère sous l'effet d'une «énergie noire». La matière composant l'univers serait elle-même dominée par une composante invisible, la «matière noire». Les extensions du

modèle standard (supersymétrie, cordes, dimensions supplémentaires...) contiennent des candidats potentiels pour cette nouvelle physique. Des mesures très précises sur les caractéristiques du fond diffus cosmologique, le diagramme de Hubble ou la détection directe de matière noire pourraient apporter la solution à cette énigme.

Une autre énigme, contemporaine de la découverte de la radioactivité, est l'origine du rayonnement cosmique. Sa définition a été aujourd'hui élargie, au-delà des particules chargées, aux photons de haute énergie, aux neutrinos et dans une certaine mesure, aux ondes gravitationnelles. Ces messagers donnent accès à des énergies hors de portée des accélérateurs. Les sites extrêmes de production de ce rayonnement pourraient remettre en cause nos idées sur les lois fondamentales. La détection des ondes gravitationnelles, prédites par la relativité générale, ouvrirait une nouvelle fenêtre sur la compréhension des événements cosmiques violents, des phénomènes au voisinage de l'horizon des trous noirs aux ondes gravitationnelles venant de l'origine de l'Univers.

## 2.1 ASTRONOMIE GAMMA

L'astronomie gamma scrute les phénomènes les plus violents du cosmos dans la gamme allant du MeV à la centaine de TeV. Elle a fait l'objet ces dernières années d'avancées considérables, grâce notamment à l'exploitation de plusieurs instruments au sol tels que Hess, Magic et Veritas, ou en orbite tels que Integral et plus récemment Fermi. Le CNRS, et en particulier l'IN2P3, assurent une forte participation française dans les expériences Hess et Fermi.

Le retour scientifique associé au détecteur Hess est considérable. La France, avec neuf laboratoires impliqués (cinq IN2P3, trois INSU, un CEA) a joué un rôle majeur dans la construction de l'expérience et a une excellente position dans l'exploitation des résultats. Hess a véritablement ouvert le champ de

l'astronomie gamma au TeV avec la découverte de dizaines d'accélérateurs cosmiques parsemés dans notre galaxie et dans l'espace extragalactique. Ces découvertes, ainsi que de nombreuses études associant de multiples longueurs d'onde, ont conduit à d'indéniables progrès dans la compréhension des processus en jeu au sein de ces différents systèmes et dans la recherche de l'origine des rayons cosmiques. La deuxième phase de Hess – un télescope de 30 mètres sera ajouté en 2011 au centre du réseau actuel – permettra d'élargir la gamme en énergie et de gagner en sensibilité, ce qui devrait augmenter significativement le nombre de sources découvertes. Le domaine devrait connaître une nouvelle révolution dans quelques années avec l'avènement du Čerenkov Telescope Array (CTA) aujourd'hui en phase d'étude, et concentrant les efforts d'une large communauté internationale.

Le satellite Fermi a été mis sur orbite en juin 2008 avec succès. Avec six laboratoires, dont trois de l'IN2P3, la France a joué un rôle important dans la construction du principal instrument, le Large Area Telescope, et s'est avantageusement positionnée dans toutes les thématiques scientifiques pour l'exploitation des résultats. Au terme de 18 mois d'observations, le premier catalogue de sources émettant entre 100 MeV et 100 GeV compte 1 451 objets, à comparer avec les 271 sources vues par son prédécesseur Egret en plus de cinq années de prise de données. On peut s'attendre, dans les années à venir, à une augmentation du nombre de sources découvertes aux énergies de Fermi et à un retour scientifique remarquable.

## 2.2 RAYONS COSMIQUES D'ULTRA HAUTE ÉNERGIE

L'exploitation de l'observatoire Pierre Auger, en Argentine, a démarré en 2004 par une phase de construction, et se poursuit à pleine sensibilité depuis fin 2007. Avec six laboratoires de l'IN2P3, la France a joué un rôle majeur dans la construction de l'observa-

toire et se situe au premier plan dans l'analyse et l'interprétation des résultats. Les données cumulées à ce jour ont permis la détermination du spectre des rayons cosmiques au-delà de 1 018 eV, caractérisant avec une précision sans précédent la région de la « cheville » (durcissement du spectre dont la nature est toujours sujette à débat) et une cassure spectrale brutale à environ  $3 \times 10^{19}$  eV. Cette dernière est conforme à la manifestation attendue de l'effet GZK. L'expérience Auger a également mis en évidence l'apparition vers  $5 \times 10^{19}$  eV d'une anisotropie des directions d'arrivée des rayons cosmiques, avec vraisemblablement une corrélation avec la distribution de matière extragalactique dans l'Univers proche, ainsi qu'une évolution de la nature (du proton au fer) avec l'énergie. L'expérience a également déterminé une limite contraignante à la fraction de photons et de neutrinos aux plus hautes énergies.

## 2.3 ONDES GRAVITATIONNELLES

Après plus de dix ans de développements, le détecteur Virgo a atteint pleinement ses objectifs technologiques, notamment aux basses fréquences où l'impact des vibrations sismiques et environnementales est redoutable. Le fait d'avoir parfaitement réussi à satisfaire ce cahier des charges laisse penser que cette communauté saura réussir les prochaines étapes : Virgo+ et Advanced Virgo. En les attendant, un partenariat solide a été construit avec la collaboration Ligo située aux USA, qui se traduit par la coordination des périodes d'observation et l'analyse conjointe des données collectées depuis mai 2007. La sensibilité atteinte permet d'établir des limites contraignantes pour la fraction d'énergie émise sous forme d'ondes gravitationnelles par le pulsar du Crabe ou de rechercher la présence de coalescences d'étoiles à neutrons jusque dans l'amas de galaxies Virgo. Avec l'avènement proche d'Advanced Virgo et d'Advanced Ligo, augmentant le volume d'observation d'un facteur mille, une détection effective d'ondes

gravitationnelles vers 2015 est une quasi certitude. Dans le cas contraire, notre compréhension de l'Univers sera à revoir.

## 2.4 TÉLESCOPES À NEUTRINOS

Un autre exemple de réussite technique est le détecteur européen Antares, en activité depuis 2008. La France a joué un rôle majeur dans la construction de l'expérience, qui a permis de démontrer la faisabilité de la technique de détection de neutrinos de très haute énergie (du TeV au PeV), grâce à un ensemble de photo-détecteurs placés au fond de la Méditerranée sur des lignes regroupant une centaine de détecteurs chacune. La détection de sources astrophysiques paraît cependant difficile du fait du dimensionnement limité du réseau, et la collaboration travaille à l'amélioration de la sensibilité par un accroissement du volume sensible (projet KM3NeT) et par la mise en réseau d'Antares avec d'autres instruments.

## 2.5 MATIÈRE NOIRE

La collaboration internationale Edelweiss, portée par participant des équipes françaises, vise la détection directe, à l'aide de détecteurs cryogéniques, de la composante non-baryonique (constituée a priori de particules interagissant faiblement surnommées WIMPs) du halo de matière noire galactique via l'observation de collisions élastiques de WIMPs sur des cibles en laboratoire. Méthode très complexe en raison du bruit de fond important provenant de la radioactivité naturelle, elle permet une analyse individuelle de chaque recul détecté. La sensibilité actuelle,  $5 \times 10^{-8}$  picobarn environ, devrait être portée à  $5 \times 10^{-9}$  pour la mesure de la section efficace WIMP-nucléon. Des technologies alternatives de détection de la matière noire sont aussi à l'étude ou en R&D. La détection directionnelle ouvre des perspectives intéressantes qui sont à l'étude. Ces

recherches directes sont complétées par des recherches indirectes par la voie neutrino et gamma.

## 2.6 FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Le satellite Planck a été lancé en 2009. Après le succès indéniable de Cobé et de WMap (observation du fonds diffus cosmologique ou CMB) et des détections de supernovae (SNF, SNLS...), qui ont permis de mesurer de façon concordante les paramètres essentiels ( $\Omega_\Lambda$ ,  $\Omega_M$ ...) de l'évolution de l'Univers, Planck permettra d'atteindre une précision proche du pourcent sur ces paramètres. Il a la capacité non seulement de cartographier les fluctuations de température avec une résolution angulaire de cinq minutes d'arc mais également d'améliorer considérablement les mesures de polarisation, permettant ainsi de d'aborder l'étude de la phase inflationnaire qui a suivi immédiatement le Big-Bang. Les premiers résultats de Planck sont prévus pour la fin 2010 et la période de mesure se prolongera jusqu'en 2012. Des expériences de mesure de la polarisation du fond cosmologique au sol (Qubic) préparent les étapes suivantes susceptibles de sonder l'échelle à laquelle se déroule l'inflation.

## 2.7 ÉNERGIE NOIRE

L'exploitation de SuperNova Factory (SNF) ainsi que le SuperNova Legacy Survey (SNLS) au télescope Canada-France-Hawaï vont arriver à leur terme en 2011. Cela permettra de contraindre l'équation d'état de l'énergie noire avec une précision proche de 5%. La variété des méthodes de détermination des paramètres d'énergie noire permises avec le Large Synoptic Survey Telescope (LSST, à l'horizon 2016) va amener la précision sur ces paramètres à 1%. De nouvelles stratégies de mesure des paramètres cosmologiques

voient leur importance augmenter comme par exemple la détection des oscillations des baryons (BAO à travers Boss). La situation programmatique autour d'une expérience spatiale reste incertaine mais une participation aux missions spatiales JDem (Nasa) ou Euclide (Esa) est envisagée.

## 2.8 ÉTUDES MULTI-MESSAGERS

La compréhension des phénomènes au sein des sites astrophysiques extrêmes va passer de plus en plus par la mise en place d'approches multi-longueurs d'onde. La communauté s'organise également pour mettre en place des approches multi-messagers, comme la recherche de coïncidences entre les détecteurs Antares et Virgo/Ligo (projet GWHEN) ou la recherche de contreparties optiques à des candidats neutrinos (TAToO) ou ondes gravitationnelles (LOOC-UP). Par ailleurs, plusieurs instruments tels les détecteurs Antares, Ice-Cube, Virgo/Ligo, Integral, Hess, Magic, Veritas et Fermi, font aujourd'hui partie du réseau d'alertes GCN (Gamma-ray Burst Coordination Network), constitué en outre de différents instruments radio, optiques et X.

## 2.9 PERSPECTIVES

Dans les deux années prochaines, les premiers résultats de Planck (2010), le lancement d'AMS (2010), la fin de construction de Hess2 (2011) et le lancement de la mission précurseur d'un observatoire d'ondes gravitationnelles (LisaPathFinder, 2012) viendront compléter ce tableau. Par ailleurs, les années à venir seront des années de préparation et de construction de la nouvelle génération d'observatoires des astroparticules (Advanced Virgo, télescope neutrino KM3Net, télescope de photons de haute énergie CTA, extensions de l'observatoire Auger) avec des fins de construction en 2015-2016. L'IN2P3 participe aussi à une expé-

rience de détection des rayons cosmiques de très haute énergie dans l'espace (2015, Jem-Euso). Dans un avenir plus lointain (2020) le projet spatial Lisa étendrait la gamme des ondes gravitationnelles accessibles à la détection en ouvrant notamment l'étude des systèmes de trous noirs super-massifs en coalescence.

## 3 – DÉVELOPPEMENT D'OUTILS

### 3.1 ACCÉLÉRATEURS

Les accélérateurs sont des outils essentiels pour la physique nucléaire et des particules, et font l'objet d'une très grande activité de R&D, de construction et d'exploitation au sein de l'IN2P3 et du CEA-IRFU. Cette activité, au rôle à la fois scientifique et sociétal, s'exprime tant dans les programmes nationaux comme Spiral2, qu'internationaux comme les projets de futurs collisionneurs, où le savoir-faire des laboratoires français est largement reconnu.

Les activités de R&D portent d'une part sur les techniques classiques d'accélération, répondant aux exigences des futures machines de forte puissance. Des études et réalisations sont menées dans le domaine des coupleurs radiofréquence, des cavités supraconductrices à fort gradient et des machines non supraconductrices à fort courant (Iphi). Nous citerons, de manière non exhaustive, le développement des coupleurs TTF (projet XFel), des cavités «spoke» pour les protons intenses de basse énergie (Eurotrans), des cavités quart d'onde pour Spiral2, ou celui des diagnostics pour fortes intensités. Ce large programme répond aux besoins de la physique nucléaire et des particules mais également à certains de ceux de l'aval du cycle électronucléaire, et il repose sur des moyens importants, comme la plateforme Supratech à Orsay.

La R&D porte également sur les techniques dites «innovantes» associées, comme le projet ELI d'étude de l'interaction laser matière, qui présente, pour l'accélération, toutes les potentialités offertes par les lasers exawatt/attoseconde, ou le projet ThomX, développé en collaboration avec Soleil, d'une machine à rayons X monochromatique compacte et fondée sur l'interaction laser-électrons.

Enfin, la R&D porte sur les sous ensembles très spécifiques comme les cibles sources, les photo-injecteurs et les canons à électrons haute-fréquence, les sources d'ions mono ou multichargés, et les sources de positrons polarisés. Nous mentionnerons enfin une participation aux projets de machines de thérapie par protons ou carbonées.

L'IN2P3 dispose de nombreuses plateformes reconnues internationalement. Altotandem à Orsay permet, outre l'étude de la photofission, de caractériser les cibles sources du type Spiral2. Jannus au CSNSM d'Orsay, offre à la communauté des moyens d'irradiation, d'implantation, et de caractérisation structurale et chimique (RBS ou PIXE). Aifira à Bordeaux offre un spectre allant de la physique des matériaux à la radiobiologie, pour la caractérisation, l'irradiation, l'imagerie et la production de neutrons mono énergétiques. Anafire à Lyon est un plateau d'expertises sur les rayonnements ionisants, avec des outils de mesure et d'analyses accrédités (développement durable, environnement, électronucléaire du futur). Peren à Grenoble fournit des neutrons rapides destinés au nucléaire innovant. Son principe a été repris pour le projet Guinevere de couplage au réacteur Venus à MOL en Belgique.

### 3.2 CALCUL INTENSIF

Le développement des grilles de calcul (utilisation optimale de moyens informatiques intensifs et distribués) touche de nombreuses autres disciplines que la physique des particules. Le CCIN2P3 a un rôle majeur sur la structuration au niveau national. De plus, la création

récente au CNRS de l'Institut des grilles, dans lequel l'IN2P3 joue un rôle important, fournit le cadre nécessaire à la mise en place d'une grille française. La structuration opérationnelle de cette grille, ainsi que la diffusion de l'expérience acquise dans le traitement massif des données vers d'autres communautés scientifiques et les régions, sont des objectifs prioritaires qui doivent se coupler au développement de collaborations sur la simulation, la modélisation et l'analyse de grands volumes de données à l'interface avec les géosciences et les sciences du vivant.

## 4 – LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET LA SOCIÉTÉ

Les recherches interdisciplinaires, menées d'une part par les laboratoires de l'IN2P3, souvent en liaison avec leur université et leur région, et d'autre part dans un cercle plus large de laboratoires sur appel d'offres, impliquent (si l'on inclut les activités sur les accélérateurs) près d'un quart du personnel de l'Institut et se développent sur trois fronts principaux :

- l'énergie (en particulier nucléaire) en s'appuyant sur les compétences de l'Institut en la matière ;

- l'interface entre physique, biologie et médecine où l'Institut fait bénéficier les sciences du vivant de ses compétences en instrumentation, accélérateurs, capteurs et traitement des données ;

- l'interface avec les géosciences où l'Institut, en synergie avec les sciences de l'Univers, déploie des grands réseaux de capteurs ou étudie des phénomènes rares qui peuvent, parallèlement aux recherches de physique fondamentale, assurer le suivi des paramètres climatiques et géologiques, la prévention des risques et la datation des processus climatiques et géologiques.

### 4.1 ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En France, environ 80 % de l'électricité est produite par la filière des centrales nucléaires. En 1991, la loi Bataille encadrait pour quinze ans les recherches menées autour des déchets nucléaires. Cette loi a été révisée en 2006, en prenant comme référence le stockage géologique profond pour les déchets existants. Néanmoins, la transmutation des déchets nucléaires reste à l'étude pour les futurs déchets, avec comme échéance le choix en 2012 entre des réacteurs rapides au sodium qui assurent la transmutation de leurs propres déchets ou des réacteurs hybrides (ADS) dédiés à la transmutation.

Les physiciens de l'IN2P3 sont impliqués dans cette thématique à travers différents axes de recherche, en particulier dans le programme national PACEN. Le premier concerne les mesures de données nucléaires : il s'agit de la détermination expérimentale des sections efficaces des diverses réactions mises en jeu pour des réacteurs utilisant les cycles de l'uranium ou du thorium (filrière étudiée au sein de l'IN2P3), ainsi que pour les déchets produits. Ces mesures alimentent les bases de données utilisées pour les simulations de réacteurs innovants. Le second axe de recherche comprend non seulement la simulation de différents types de réacteurs (à sels fondus, rapides ou à eau) envisagés pour la production d'énergie ou la transmutation des déchets, mais également les études de scénarii impliquant diverses sources de production d'énergie. Enfin, les physiciens de l'IN2P3 sont fortement impliqués dans l'étude expérimentale de la physique des réacteurs, en particulier dans le cadre du projet Guinevere déjà mentionné. Par ailleurs, des travaux de radiochimie et d'études de matériaux sous irradiation sont également menés dans les laboratoires de l'IN2P3, dans le cadre du stockage des déchets radioactifs ainsi que de la séparation des éléments du combustible.

La poursuite de ce programme électro-nucléaire engendre un besoin de compétences chez les acteurs publics ou privés du domaine. De nouvelles formations universitaires sont

mises en places et les chercheurs de l'IN2P3 sont fortement sollicités pour y jouer un rôle moteur.

épiderme, organismes modèles) sur (micro) faisceaux (Aifira, Ganil) et par la modélisation (Geant4-DNA).

## 4.2 INTERFACE PHYSIQUE-BIOLOGIE-MÉDECINE

La lutte contre le cancer fait partie des grandes causes nationales. Parmi les nombreuses pistes prometteuses qu'a dégagées la recherche récemment, les techniques de médecine « nucléaire » figurent de façon prééminente. Or, elles peuvent très souvent bénéficier du transfert assez direct des dernières avancées en recherche fondamentale, aussi bien en matière de détecteurs, de faisceaux de particules que de simulation de l'interaction particule-matière. La période 2008-2009 a été mise à profit afin de structurer les activités de l'IN2P3 à l'interface avec la médecine dans le cadre du GDR MI2B. Le projet « Instruments et méthodes nucléaires pour la lutte contre le cancer » décrit des axes de recherche innovants en radiothérapie, curiethérapie, hadron-thérapie, imagerie médicale et simulation (Gate) à poursuivre activement.

L'interaction de particules chargées avec le milieu vivant joue un rôle prépondérant dans l'étude de la cohérence des systèmes vivants mais aussi dans de nombreux domaines : exposition aux rayonnements naturels (radon), exposition professionnelle, cancérogénèse, thérapie anticancéreuse par particules chargées. Comprendre comment de telles radiations agissent, notamment lors de l'exposition à de très faibles doses, reste un enjeu majeur passant par des études à l'échelle cellulaire. La structuration des activités à l'interface avec la biologie est donc une nécessité pour la période 2010-2013 pour coordonner les efforts des équipes de l'IN2P3 en bio-informatique, radiobiologie et dans l'étude des systèmes biologiques (biomatériaux,

## 5 – CONCLUSIONS

La physique subatomique est en train de vivre une étape majeure dans son développement. Après de nombreuses années de travail préparatif, des équipements et des instruments majeurs sont en train de démarrer pour apporter des réponses aux questions fondamentales que nous nous posons.

La mise en service du LHC et de ses expériences devrait nous éclairer sur l'existence du chaînon manquant du modèle standard (le boson de Higgs), et de physique au delà de ce modèle... Le LHC sera également un outil remarquable pour étudier les transitions de phases de la matière hadronique et les collisions d'ions lourds constituent désormais un des axes forts du programme de physique nucléaire.

Sur la lancée des résultats importants apportés par des expériences comme Hess et Auger, et des réussites techniques que constituent la mise sur orbite de Planck et de Fermi, la réussite technique remarquable de Virgo ou encore le démarrage d'Antares, la communauté s'organise pour la préparation du futur. Il en est ainsi de la préparation des futurs réseaux CTA ou KM3NET, de l'extension d'Auger, ainsi que du développement de projets terrestres dédiés à la mesure de la polarisation du CMB. Concernant l'étude des propriétés des neutrinos, Double Chooz et T2K donneront probablement la première valeur de l'angle de mélange des neutrinos  $\theta^{13}$ .

Les études avec les faisceaux radioactifs et de nouveaux multi-détecteurs sont la voie ouverte par SPIRAL2 qui est en construction au GANIL.



# 04

---

## ATOMES ET MOLÉCULES, OPTIQUE ET LASERS, PLASMAS CHAUDS

*Président*

Jacques ROBERT

*Membres de la section*

Lamri ABOUI

Philippe BALCOU

Karine BEROFF-WOHRER

Philippe BOUYER

Denis DOUILLET

Philippe DUGOURD

Valentina EMILIANI

Philippe GHENDRIH

Pierre GILLIOT

Guillaume HERLEM

Thérèse HUET

Vincent LONG

Alexandre MATZKIN

Guy MILLOT

Martine RICHARD-VIARD

Isabelle ROBERT-PHILIP

Christophe SALOMON

Patricia SELLES

Jorge TREDICCE

### 1 – INTRODUCTION

La physique atomique et moléculaire et l'optique nous ont permis d'élaborer une image de notre monde simple et efficace. C'est dans ces disciplines que sont apparues les théories statistiques, l'électromagnétisme et la relativité et la mécanique quantique. Avec les lasers et les plasmas, son champ d'étude s'est ouvert sur la dynamique non linéaire et en a permis de belles illustrations. Ce domaine, où l'expérimentation peut rester à l'échelle humaine, est un espace de rupture, qui a toujours su tirer parti des innovations technologiques dont il a été souvent le moteur. C'est pour cela qu'il reste toujours et encore bien vivant et fascinant. Les maîtres mots qui résumeraient ce rapport de conjoncture sont « contrôle et cohérence ». C'est cette même vague qui a permis les progrès spectaculaires dans les domaines de la métrologie, de l'information quantique, des gaz quantiques, de la dynamique quantique des molécules et agrégats en laboratoire ou en milieu naturel. Elle a accompagné les avancées foisonnantes de la physique des lasers et de l'optique quantique, qui opèrent le lien entre les différentes échelles qui structurent ou déstructurent la matière et qui nous ont ouvert un nouveau regard sur le vivant. Si les nanosciences sont le creuset où se construisent nos instruments et

notre communication futurs, l'énergie qu'il faudra bien y injecter sera issue des machines qui maîtriseront la fusion thermonucléaire.

## 2 – UN ÉTAT DES LIEUX

### 2.1 PROCESSUS FONDAMENTAUX EN PHYSIQUE QUANTIQUE PHYSIQUE ATOMIQUE, ATOMES FROIDS, GAZ QUANTIQUES MÉTROLOGIE INFORMATION QUANTIQUE

La physique des atomes et molécules a subi des développements spectaculaires ces quatre dernières années, et tout laisse à penser que ces développements vont continuer à ouvrir de nouvelles thématiques au sein de cette discipline mais aussi, très souvent, à l'interface avec d'autres disciplines de la physique.

Ainsi, l'invention des peignes de fréquence à l'aide de lasers femtosecondes a ouvert la voie non seulement au développement des horloges optiques, avec une nouvelle génération de tests des lois fondamentales de la physique, mais bien au-delà, elle est en train de révolutionner la spectroscopie à transformée de Fourier, d'apporter des références exactes en astrophysique ou encore dans le domaine des impulsions cohérentes ultracourtes.

De même, dans le domaine des atomes ultrafroids, le régime des fortes corrélations quantiques atteint récemment (isolant de Mott, fermions fortement corrélés, gaz ultrafroids en dimensions réduites) ou encore l'observation de la localisation d'Anderson d'ondes de matière constituent un pont très fructueux avec la physique statistique, la physique de la matière condensée et la physique nucléaire. L'excellent contrôle qu'apporte la physique atomique sur ces gaz quantiques a permis d'apporter des réponses à des pro-

blèmes théoriques soulevés parfois depuis plus de 50 ans et non encore résolus. En parallèle, les progrès pour produire des molécules froides ont été spectaculaires, illustrant comment l'excellente connaissance des processus fondamentaux permet, dans un second temps, d'inventer de nouvelles méthodes pour produire des objets plus complexes qui seront, à leur tour, exploités en physique moléculaire.

L'étude des processus quantiques les plus fondamentaux comme la non-séparabilité en mécanique quantique ou l'intrication a conduit à de spectaculaires réalisations expérimentales, comme l'observation directe de photons individuels sans les détruire, à la génération d'états intriqués à grand nombre de particules, à la génération de photons uniques avec des applications concrètes en cryptographie quantique ou information quantique. Certes la réalisation d'un ordinateur quantique « utile » reste hors du cadre de ce rapport de conjoncture mais de nombreuses avancées majeures ont été réalisées dans ce domaine.

### Physique et processus quantiques, lois fondamentales

#### Mesures de précision

Les méthodes de spectroscopie modernes et le contrôle du mouvement des atomes et des molécules sont à l'origine d'avancées spectaculaires en termes de précision. L'échelle des énergies atomiques est gouvernée par la constante de Rydberg mesurée par spectroscopie laser sur l'atome d'hydrogène au niveau de  $10^{-12}$ ; la constante de structure fine, qui caractérise la force de l'interaction électromagnétique, est désormais mesurée avec une incertitude de  $4 \cdot 10^{-9}$  avec des atomes froids; les horloges qui pilotent le Temps Atomique International sont des fontaines à atomes froids dont la stabilité de fréquence atteint  $10^{-16}$  après quelques jours de mesure et les horloges optiques sont en passe d'obtenir cette performance sur quelques dizaines de secondes. Une mesure récente du rayon de charge du proton sur l'hydrogène

muonique a révélé un désaccord significatif avec des mesures antérieures et soulève d'intéressants problèmes d'interprétation ou révèle peut-être une nouvelle physique.

L'interféromètre optique du grand instrument franco-italien VIRGO atteint une sensibilité record qui ouvre la perspective fascinante de détecter les ondes gravitationnelles émises par les événements violents, qui se produisent au sein de l'univers, comme la fusion de deux trous noirs ou l'explosion d'une supernova. La détection directe des ondes gravitationnelles testera une prédiction centrale de la relativité générale. En astrophysique, elle ouvrira aussi une nouvelle fenêtre d'observation de l'univers qui viendra compléter l'information fournie par l'analyse de la lumière recueillie par les télescopes.

Les peignes de fréquence des lasers femtoseconde apportent une révolution pour couvrir la gamme complète des fréquences optiques aux fréquences micro-ondes ; associés aux méthodes de transfert de temps par fibres optiques sur plusieurs centaines de kilomètres, ils permettent de rendre accessibles à tous les signaux des meilleures horloges. Ainsi, toute fréquence en dessous du PHz environ peut désormais être mesurée aujourd'hui avec au moins 16 chiffres significatifs.

Le domaine des senseurs inertiels par interférométrie atomique a subi une forte expansion avec, d'une part, des instruments opérationnels qui ont détecté les ondes sismiques de plusieurs tremblements de terre avec une très bonne résolution temporelle et, d'autre part, la construction de nouveaux instruments plus précis visant en particulier la mesure précise de forces à courte distance. L'exploitation du laser à atomes, l'analogie pour les ondes de matière du laser optique pour les ondes lumineuses, ouvre des perspectives intéressantes dans ces domaines.

Dans le cadre de la mission spatiale PHARAO/ACES supportée par le CNES et l'ESA, une horloge à atomes froids sera embarquée à bord de la station spatiale internationale entre 2013 et 2015. Cette mission permettra *via* des comparaisons d'horloges de très grande

précision, des tests sur la stabilité des interactions fondamentales déterminant la position des niveaux d'énergie atomiques ou moléculaires (interaction forte, faible et électromagnétique, rapport des masses de l'électron et du proton). Finalement un enjeu majeur de la détermination précise des constantes fondamentales est la redéfinition prochaine du système international d'unités, dont les implications commerciales sont considérables à l'échelle mondiale.

## Gaz quantiques

Les gaz d'atomes froids apparaissent désormais comme des objets très prometteurs pour simuler des systèmes plus complexes de matière condensée. Plusieurs voies ont subi des développements spectaculaires ces dernières années, la physique des gaz quantiques en dimension réduite, les gaz de Fermi en interaction forte, les gaz dipolaires et les mélanges, la localisation d'Anderson d'ondes de matière et le couplage d'un condensat de Bose-Einstein avec une cavité optique de haute finesse en sont quelques exemples.

Les gaz quantiques permettent d'aborder des situations de basse dimensionnalité, dont l'importance pratique est considérable : la supraconductivité à haute température, ou encore l'effet Hall quantique avec ses excitations « anyoniques », sont des phénomènes liés intrinsèquement à la physique à deux dimensions. Ainsi, la transition superfluide (Kosterlitz-Thouless) a été récemment mise en évidence dans des gaz d'atomes froids. Plusieurs projets sont à l'étude pour générer des champs de jauge artificiels sur ces gaz atomiques, qu'ils soient continus ou confinés de manière discrète sur les sites d'un réseau optique. Ceci permettra de simuler le magnétisme des gaz d'électrons, élément essentiel de la physique de la matière condensée.

Une seconde direction très active, aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental, concerne les gaz de Fermi avec interactions ajustables. L'équation d'état et le diagramme de phase ont été établis pour des fermions

avec interaction en ondes de force arbitraire, un problème soulevé dès les années 1980 et très difficile à traiter sur le plan théorique, à cause des fortes corrélations. Ce problème est universel, car il s'applique à tout système dont l'interaction est décrite par un potentiel de contact. Une telle équation d'état s'applique en effet aussi bien aux gaz ultrafroids qu'à la couche externe des étoiles à neutrons, bien que 24 ordres de grandeur en densité les séparent. Ainsi, plusieurs théories quantiques à N-corps ont pu être validées (ou invalidées !) par l'expérience.

Grâce à un nouveau type de cavité optique fibrée de finesse  $F > 100\,000$  directement couplée à un micro-circuit à atomes, pour la première fois des expériences d'électrodynamique quantique en cavité avec des condensats de Bose-Einstein (CBE) ont pu être réalisées. La situation physique est nouvelle, car, à la fois le couplage atome-photon et le mouvement atomique se trouvent dans un régime quantique. Ces résultats ont stimulé le développement d'une nouvelle optomécanique en cavité avec des CBE.

Le domaine des gaz quantiques est également un domaine où le couplage théorie-expérience est très fructueux. Plusieurs avancées théoriques importantes ont été réalisées dans ce cadre, comme la solution du problème de 3 fermions en interaction dans un piège harmonique, le comportement d'un gaz de polarons fermioniques, la comparaison directe entre expériences et simulations quantiques par la méthode de champ moyen dynamique pour le problème de la transition métal isolant de Mott, la proposition d'un système nouveau pour la localisation d'ondes de matière par un potentiel désordonné, les propriétés des gaz dipolaires, etc.

On le voit, les gaz atomiques froids permettent d'aborder des problèmes difficiles, comme les transitions de phase quantique, induites par le désordre (localisation d'Anderson) ou bien par les interactions entre particules (localisation de Mott) ; ils provoquent ainsi un renouvellement complet de cette thématique de recherche.

Une nouvelle voie d'études très prometteuse se branche aujourd'hui sur les gaz quantiques : celle des molécules ultrafroides, qui est en développement très rapide depuis quelques années (*cf. infra*)... Elle ouvre un nouveau domaine pour la chimie, avec la possibilité d'un contrôle sans précédent sur les paramètres des échantillons.

## Information quantique

Si les concepts de l'information quantique sont nés il y a près de trente ans, ce domaine connaît un regain d'intérêt depuis une quinzaine d'années avec les premiers algorithmes exploitant le parallélisme massif offert par les systèmes quantiques. À l'interface entre la mécanique quantique et le traitement de l'information, l'information quantique peut se diviser en deux pans : le traitement de l'information quantique qui est le pendant classique du traitement de l'information classique, et les communications quantiques, pendant quantique des communications classiques.

## Distribuer des clés secrètes

On peut qualifier de dispositif de communication quantique tout système qui exploite le principe d'incertitude ou l'intrication quantique, pour échanger des clés secrètes de cryptage. Plusieurs protocoles (à variables discrètes, continues ou recourant à des états leurs) ont été proposés et expérimentalement mis en œuvre ces dix dernières années. À ce jour, dans toutes les expériences de distribution quantique de clé, l'information est codée sur des états quantiques de la lumière, même si d'autres schémas recourant à des atomes ou des ions sont explorés. Ces expériences de cryptographie quantique sont devenues des expériences de routine en laboratoire aujourd'hui. Cependant, de nombreuses difficultés à la fois expérimentales et conceptuelles freinent encore aujourd'hui le déploiement de tels systèmes d'échange de clé secrète, sur de longues distances et avec des taux de généra-

tion de clés élevées. Un défi majeur actuel est de répondre à ces enjeux.

D'un point de vue théorique, les travaux portent aujourd'hui sur l'efficacité et la sécurité de l'échange. À titre d'exemple, on peut mentionner les recherches visant à étendre les preuves de sécurité lorsque la clé échangée est de taille finie. D'un point de vue expérimental, que ce soit pour des communications par fibre optique ou bien en espace libre, par exemple vers des satellites, les efforts se portent notamment aujourd'hui sur l'ingénierie de détecteurs à plus faible bruit et plus rapides, sur l'amélioration des sources d'états quantiques de la lumière... Pour étendre les distances d'échange de clé et implémenter des réseaux quantiques, le développement des pendents classiques des relais et répéteurs, se poursuit. Les relais quantiques exploitent la téléportation quantique et le transfert d'intrication. Ceci suppose le recours de sources efficaces d'états intriqués de la lumière et de pouvoir réaliser des expériences de transfert d'intrication sur de longues distances et en espace libre. Quant à l'implémentation de répéteurs quantiques, elle requiert de disposer de mémoires quantiques, dispositifs capables de stocker un état quantique et de le restituer à la demande.

### **Interfaces et mémoires**

Le développement de telles mémoires quantiques et interfaces entre les vecteurs de l'information quantique (états quantiques de la lumière) et les systèmes de stockage ou traitement de l'information (atomes, ions, systèmes solides...), est un autre axe majeur de recherche qui constitue un véritable challenge. Le support du bit quantique d'information peut être une vapeur atomique ou un nuage d'ions piégés ou bien encore des ions terre rare en matrice solide. Ce support doit présenter conjointement un très bon couplage avec la lumière (pour les phases de transfert – écriture ou lecture) ainsi qu'un temps de cohérence très long (pour le stockage). Des expériences de mémoires quantiques ont déjà été mises en œuvre, dans lesquelles les supports physiques étaient par

exemple des vapeurs atomiques ou des ions contenus dans une maille cristalline solide. Les grands enjeux seront d'accroître la capacité de stockage de telles mémoires par la réalisation de mémoires multimodes, d'améliorer la restitution et la fidélité de stockage ainsi que de développer des techniques de corrections d'erreurs pour de longs temps de stockage.

### **Réaliser des opérations de logique quantique**

Le traitement de l'information quantique est exploré depuis une quinzaine d'années. De nombreuses expériences s'efforcent de mettre en œuvre les algorithmes proposés qui exploitent le principe de superposition ou encore l'intrication. De nombreux supports physiques sont à l'étude pour réaliser des opérations de logiques quantiques : ions piégés, molécules, atomes neutres, électrodynamique quantique en cavité, circuits supraconducteurs, nano-émetteurs solides (boîtes quantiques semiconductrices, centres colorés dans le diamant...), spin d'impuretés dans des matrices solides, photons... Si certains sont plus matures que d'autres, aucun cependant ne remplit l'ensemble des pré-requis nécessaires pour mettre en œuvre de façon complètement satisfaisante les opérations de traitement de l'information quantique. Il convient donc encore aujourd'hui d'explorer et améliorer les potentialités de ces systèmes ainsi que de réaliser sur la plupart de ces supports, des premières opérations à deux ou plusieurs bits quantiques. Au-delà de l'ingénierie de dispositifs réalisant des algorithmes quantiques à quelques bits voire quelques dizaines de bits quantiques, il convient d'étendre le domaine possible du traitement de l'information quantique, par le développement de nouvelles architectures, nouveaux algorithmes et codes correcteurs d'erreurs, par le développement de nouvelles interfaces ou par l'étude des potentialités des qubits topologiques par exemple. Les travaux théoriques plus fondamentaux seront tout aussi nécessaires. On peut citer ici pour exemple la théorie de la décohérence et de l'intrication, notamment multi-particules.

## **2.2 MOLÉCULES, BIOMOLÉCULES ET AGRÉGAT : EN PHASE DILUÉE, EN SURFACE, EN PHASE CONDENSÉE : STRUCTURE ET DYNAMIQUE FRAGMENTATION ET AGRÉGATION APPLICATIONS À LA PHYSICOCHIMIE, À L'ENVIRONNEMENT ET L'ASTROPHYSIQUE**

### **Molécules, ions, agrégats en phase gazeuse**

La dynamique de petits systèmes de taille finie, étudiée par une large palette de modes d'excitation (photons, électrons, ions), constitue un cas modèle d'interaction fondamentale de N-corps en interaction coulombienne. Un intérêt particulier est porté à quantifier le rôle des corrélations électroniques et à étudier les processus de dissociation au sens large (émission électronique, production de fragments et leur couplage) dans les atomes, ions et molécules. Des travaux très nombreux ont été menés sur des tout petits systèmes ( $H_2$ ,  $N_2$ , molécules triatomiques) permettant des investigations expérimentales et théoriques approfondies. Le développement de techniques de détection donnant accès aux corrélations vectorielles entre les particules émises a permis d'imager la dissociation moléculaire et d'analyser les mécanismes complexes de compétition entre relaxation électronique et dissociation. L'étude de l'émission électronique depuis une cible multicentrique est désormais accessible directement dans le référentiel de la molécule. Des figures d'interférence spectaculaires dans l'émission électronique à partir de  $H_2$  ont été obtenues dans des expériences de collision avec des ions multichargés. L'exploration de la compétition entre dissociation partielle et totale atomisation, entre fragmentation directe et séquentielle ou encore la dynamique de dissociation d'espèces multi-chargées s'est poursuivie sur les molécules plus complexes.

Le développement des sources laser courtes et ultra-courtes a permis des avancées au

niveau de la compréhension de la dynamique de relaxation au sein des édifices moléculaires excités. Les techniques pompe-sonde ont tracé le suivi de nouvelles classes d'états (états se dissociant par paires d'ions par exemple) et mis à jour les mécanismes de relaxation dans de nouvelles classes de molécules (cycles fermés par liaisons hydrogènes, molécules bi-stables...). Les sources femtoseconde sont également un outil permettant la manipulation à l'échelle moléculaire : c'est le domaine du « contrôle cohérent », dans lequel les impulsions peuvent être utilisées pour préparer le système afin d'en stimuler l'évolution dans une direction choisie. C'est là un vaste champ de recherche puisque, pour favoriser une réaction donnée, il faut optimiser la forme spectrale et temporelle des impulsions. Dans ce dernier domaine, et plus particulièrement dans le domaine des impulsions attosecondes (as), les progrès ont été considérables, à l'interface de la physique moléculaire et de l'optique non-linéaire. Les avancées récentes se réfèrent notamment à la génération d'harmoniques élevées (HHG) à partir de molécules alignées permettant un contrôle des impulsions attosecondes, à la tomographie des orbitales moléculaires et à la dynamique électronique à l'échelle attoseconde dans les molécules. L'utilisation de sources attoseconde ouvre ainsi la voie à un champ encore totalement inexploré, celui de l'ère post Born-Oppenheimer.

Des expériences de photoionisation en couche interne effectuées auprès du centre de rayonnement synchrotron BESSY à Berlin (Allemagne) permettent d'étudier le dichroïsme circulaire ou d'observer des effets non dipolaires de l'interaction photon-molécule. L'étude de la relaxation des molécules excitées en couche interne représente un centre d'intérêt majeur pour les expériences de type « pompe-sonde » utilisant la combinaison entre le rayonnement synchrotron et un laser optique. La haute résolution spectrale et la forte intensité du laser sont utilisées dans ce type d'expérience pour sonder les fragments d'un processus de photodissociation induit par un rayonnement XUV. Le but principal de ces expériences est de fournir une meilleure compréhension du couplage entre le mouve-

ment des noyaux et des électrons, ainsi que de préciser son influence sur le processus de fragmentation.

Les agrégats continuent à être étudiés pour leurs propriétés intrinsèques (variabilité des propriétés avec la composition et la taille, effets liés au confinement). Des avancées importantes ont été obtenues ces quatre dernières années, notamment en ce qui concerne leur propriétés thermodynamiques (températures de fusion, nouvelles techniques de calorimétrie), l'étude du processus d'agrégation au niveau moléculaire, l'étude des voies de relaxation et l'apport des expériences aux modèles statistiques, la fragmentation des agrégats multi-chargés (partage de l'énergie, dynamique moléculaire quantique), l'étude des systèmes solvatés et à très grand nombre de degrés de liberté (multi-dimensionnels), les propriétés optiques, magnétiques et de transport (dépendant du spin) dans les nanostructures. Les agrégats métalliques, de gaz rare ou d'eau, sont également utilisés comme supports réactionnels modèles et des études sur des systèmes hydrides agrégats/biomolécules sont en train d'émerger. Il s'agit dans ce dernier cas d'utiliser l'agrégat comme marqueur optique et de comprendre l'éventuelle influence de l'agrégat sur les propriétés structurales de la biomolécule.

## Molécules et chimie froides

Le refroidissement, le piégeage et le contrôle des molécules froides connaissent des progrès importants. La formation de molécules dans des gaz atomiques dégénérés par association magnétique a été réalisée par plusieurs équipes, la stabilité et les états moléculaires obtenus étant mieux contrôlés. Les méthodes basées sur la photo-association d'atomes froids ont également connu une variété et une sophistication croissantes : par exemple un montage combinant la photo-association avec un pompage optique permet de former des molécules froides dans un niveau vibrationnel choisi (y compris dans le niveau d'énergie le plus bas). Les méthodes de refroidissement direct de molécules, basées sur l'uti-

lisation de champs électrique ou magnétique ou par des collisions avec un gaz tampon refroidi, sont beaucoup plus générales dans leurs applications mais ne permettent pas encore de descendre sous le millikelvin. La variété de ces méthodes directes, fruit d'un développement instrumental conséquent, permet de traiter différents types de molécules (neutres, polaires, paramagnétiques...) y compris des polyatomiques.

Les développements et les calculs théoriques, qui ont été cruciaux pour déterminer les paramètres propices à l'obtention de molécules froides par magnéto ou photo-association d'atomes alcalins ne peuvent par nature être aussi précis lorsqu'il s'agit d'étudier le refroidissement de molécules plus complexes ou lorsque des interactions à plusieurs corps doivent être prises en compte. C'est pourquoi des efforts importants visent à obtenir des simulations numériques réalistes afin de préparer le terrain expérimental.

Les molécules froides obtenues permettront de nombreuses applications, dont certaines sont en cours de réalisation. Les gaz dégénérés de molécules ont des propriétés différentes des gaz atomiques, avec des effets collectifs pouvant être exploités dans des réactions chimiques. La spectroscopie des molécules froides atteindra une résolution inégalée : le contrôle hautement sélectif des états moléculaires permet une « chimie froide » basée sur le contrôle précis des réactions, alors que la haute résolution laisse déjà entrevoir des possibilités de tester les lois fondamentales, comme le rapport des masses du proton et de l'électron.

## Interface avec l'astrophysique et l'environnement

La physique moléculaire joue un rôle majeur dans les milieux astrophysiques. Plus de 150 molécules, dont certaines assez complexes ( $\leq 13$  atomes), ont d'ores et déjà été identifiées dans le milieu interstellaire (MIS) et circumstellaire. De nombreux chercheurs de la section 04 sont impliqués dans des études structurales de ces molécules complexes, se trouvant

dans leur état fondamental ou dans des états électroniques ou vibrationnels excités. Ces études, associées aux progrès en instrumentation au niveau de la détection, permettent de découvrir environ cinq nouvelles espèces par an tels les anions moléculaires identifiés en 2006. La dynamique de relaxation des espèces excitées, les processus de collision et de réactivité, et d'une manière générale l'étude des processus physico-chimiques prenant place dans des environnements très divers (température, état d'ionisation, rayonnements), constituent un autre pôle d'étude très fort de la section 04. Outre la chimie en phase gaz, il est désormais prouvé que la chimie sur les grains est capitale pour rendre compte de l'évolution des espèces. L'étude de cette chimie hétérogène sur surfaces froides est en plein essor, expérimentalement et théoriquement. L'astrophysique de laboratoire est aussi un domaine très actif. L'idée consiste à reproduire, à des facteurs d'échelle spatial et/ou temporel près, des objets astrophysiques que l'on souhaite étudier. Les zones de formation de suies, certains processus physico-chimiques sont ainsi étudiés en laboratoire ainsi que, à l'interface avec la physique des plasmas, les chocs radiatifs et les jets stellaires.

La modélisation des milieux et de leur évolution est basée sur la connaissance des données de physique atomique et moléculaire. Outre leur participation à la mise au point de bases de données fiables, les chercheurs s'impliquent de plus en plus dans cette modélisation, souvent en collaboration avec des équipes de l'INSU. Une avancée très récente se réfère à la prise en compte et à la propagation des erreurs dans les modèles ainsi qu'à la recherche des réactions-clés, aussi bien dans les modèles du MIS que dans les modèles des atmosphères planétaires. Les observations et le développement de nouveaux instruments dédiés, activités menées essentiellement au sein de l'INSU pour l'astrophysique, n'en demeurent pas moins un puissant moteur pour les recherches menées dans les autres instituts. La préparation du lancement de HERSCHEL, effectué avec succès en mai 2009, a en effet généré de nombreuses études de spectroscopie et de dynamique, notamment pour

les molécules organiques complexes, les HAP, H<sub>2</sub>O et leurs agrégats.

L'étude des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère terrestre reçoit une attention soutenue. L'impact sociétal majeur de la pollution atmosphérique a permis de financer des programmes scientifiques d'envergure, en particulier des missions satellitaires avec des instruments embarqués couvrant la gamme spectrale de l'UV-visible et de l'IR thermique. Les laboratoires de la section 04 contribuent à la conception et au développement de spectromètres embarqués et à l'exploitation des données. Cette dernière activité nécessite aussi une importante contribution de la communauté spectroscopique, afin d'alimenter les bases de données. Les instrumentations de laboratoire continuent à se développer (notamment avec une sensibilité accrue, en mettant en œuvre les techniques lasers récentes – CRDS, CEAS, peignes de fréquences). Les atmosphères des planètes géantes font également l'objet de nombreuses études. En particulier les spectres infrarouges et UV/Vis de l'atmosphère de Titan, obtenus par la mission CASSINI, ont permis de caractériser cette atmosphère depuis les hautes altitudes jusqu'au sol. Des expériences de cinétique chimique à basses températures, de photo-dissociation permettent de produire des données nécessaires à la modélisation de ce type d'atmosphère. Cette thématique génère aussi des études qui vont de la spectroscopie haute résolution de molécules simples et de ses isotopes, comme le méthane ou l'éthylène, à la structure vibrationnelle d'agrégats carbonés. Dans ce dernier cas, les approches expérimentales utilisées en laboratoire, permettent aussi de contribuer à l'étude de phénomènes de combustion, par exemple via la caractérisation de suies.

Pour toutes ces études d'intérêt astrophysique et atmosphérique, il convient de noter l'utilisation grandissante du synchrotron SOLEIL (TGIR), en particulier les lignes de lumière AILES pour l'IR/THz et DÉSIRS pour l'UV.

## Interface avec la biologie

Les progrès en physique moléculaire, nanoscience, optique, microscopie... ouvrent l'accès à l'analyse et la compréhension des systèmes biologiques à l'échelle moléculaire. Ils permettent ainsi d'aborder de nouveaux problèmes et de préciser les mécanismes qui interviennent dans le fonctionnement de la cellule vivante. De très nombreux chercheurs de la section 04 travaillent à cette interface. On a assisté ces quatre dernières années à une évolution des thématiques de l'étude de systèmes modèles vers l'étude de biomolécules ou édifices moléculaires fonctionnels.

Les études de molécules d'intérêt biologique en phase gazeuse connaissent un essor remarquable. Avec une approche de type «bottom-up», les enjeux recouvrent la connaissance de leur structure et de leur réactivité, l'analyse des dommages d'irradiation, l'étude de l'influence de la solvatation, essentielle pour rendre compte du comportement *in vivo*, la mise au point de molécules biomimétiques. Des progrès notables ont été obtenus concernant la fragmentation de ces espèces en appliquant les techniques les plus avancées (multi-coïncidences entre fragments par exemple). Les couplages spectrométrie de masse et spectroscopie optique se sont fortement développés dans le domaine infra-rouge, visible et UV et ont été étendus à l'UV lointain. Sont également apparus des couplages avec des faisceaux d'ions et la mobilité ionique, cette dernière technique permettant l'étude des changements conformationnels. Ceci a permis ces quatre dernières années, grâce aussi au développement des outils théoriques, la caractérisation de systèmes biologiques en phase gazeuse de plus en plus complexes (protéines, complexes peptide-ligand, complexes moléculaires faiblement liés...) ouvrant ainsi la voie à l'étude de systèmes fonctionnels totalement isolés.

## 2.3 COLLISIONS ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES, PROCESSUS RÉACTIONNELS, INTERACTIONS AVEC DES SURFACES

### Surfaces

L'essor des thématiques surfaces s'est poursuivi et amplifié ces dernières années. Les sujets d'étude concernent les propriétés intrinsèques de surface, les propriétés des adsorbats déposés sur surface (atomes, molécules, agrégats) et le contrôle du dépôt pour nanostructurer et fonctionnaliser les surfaces, la réactivité spontanée ou provoquée, les propriétés catalytiques des nanoparticules déposées, les processus d'auto-assemblage, la manipulation des molécules individuelles par excitation électronique localisée... Par rapport aux études menées dans les autres sections, celles menées au sein de la section 04 ont comme particularité d'utiliser largement les collisions avec des ions, électrons, atomes comme sondes de la surface et de s'intéresser au rôle environnant de la surface sur les propriétés des systèmes moléculaires.

Ces études bénéficient d'outils variés toujours en évolution : sondes optiques, faisceaux d'ions, électrons, atomes (nouvelle technique de caractérisation de surfaces par impact d'atomes rapides à incidence rasante), diffraction par neutrons et rayons X, sondes locales en champ proche (STM, AFM), techniques pompe-sonde avec des impulsions femtoseconde... La technique de génération de fréquence somme (SFG) avec des impulsions femtoseconde permet de sonder sélectivement l'interaction molécule-surface ou molécule-nanoparticule aux temps courts. La manipulation de molécules individuelles par STM et AFM est désormais couplée avec des impulsions laser pour l'étude de nouveaux processus contrôlés (par exemple dissociation d'une molécule unique). Des techniques couplées visant à sonder à la fois les propriétés électroniques et vibrationnelles de monocouches déposées sur substrat, dans le contexte de la fonctionnalisation des SAM's (métallisation), sont également mises en œuvre.

Des résultats nouveaux ont été obtenus en ce qui concerne la nanostructuration de surface par réactivité provoquée, la chimie dans les glaces par impact d'électrons, le contrôle des molécules individuelles (nano-machines moléculaires) et la perspective d'une nouvelle «chimie sous pointe», la compréhension des mécanismes de dépôt d'agrégats et le rôle de la surface dans l'auto-organisation et la synthèse de nouveaux édifices, les propriétés des agrégats déposés, la fonctionnalisation des surfaces pour de nombreuses applications (nanocatalyse, capteurs chimiques et biochimiques, membranes, substrats pour culture cellulaire, dispositifs pour l'électronique)...

Une activité théorique dynamique est menée en parallèle. Des résultats inédits ont été obtenus concernant la dynamique électronique au sein de nano-objets (nanofils, corrals) déposés en surface qui ouvrent des perspectives nouvelles en électronique moléculaire. Les études sur les formations de molécules sur surfaces, et d'une manière générale l'étude des interfaces gaz-solide dans le contexte de l'astrophysique sont très actives. C'est aussi le cas des études liées à la fusion, telles que l'interaction plasma-surface. Les traitements théoriques de la surface, de ses adsorbats et incluant souvent la sonde de champ proche, sont menées au plus près des études expérimentales.

## Dynamique moléculaire

La dynamique des systèmes moléculaires constitue un domaine où la simulation est essentielle à la compréhension, en raison de la grande variabilité et de la complexité croissante des objets. Les enjeux en sont multiples. En dehors de la précision nécessaire au calcul des surfaces de potentiel par exemple pour la spectroscopie et en particulier dans le cas des molécules froides, les efforts actuels portent sur les calculs (*ab initio* ou non) de dynamique moléculaire, la description des états vibrationnellement et électroniquement excités, le couplage électron-structure et les processus nonadiabatiques, les simulations aux temps longs, les phénomènes multi-échelles, le cou-

plage avec l'environnement ou les champs extérieurs...

Ceci implique des développements théoriques, méthodologiques et algorithmiques. En particulier le besoin de combiner des théories différentes (approches mixtes ou hybrides) apparaît nécessaire dans nombre de situations (systèmes hétérogènes, sites actifs, relaxations à des temps très variables etc...) et connaît un essor très important actuellement. Avec l'étude de gros systèmes, l'étude de systèmes solvatés, certaines méthodes théoriques utilisées en matière condensée apparaissent de plus en plus pertinentes et les liens entre les deux communautés sont clairement en train de se renforcer.

## 2.4 CONTRÔLER LES PROCESSUS OPTIQUES POUR LES FONCTIONNALISER

Les sciences optiques et photoniques vivent actuellement une véritable révolution due à la conjugaison de nombreuses avancées fondamentales issues de l'optique non-linéaire et ultrarapide, de l'optique quantique, des fibres optiques, de l'optique guidée et de champ proche. Cette discipline scientifique connaît un essor considérable et diffuse très largement dans tous les domaines de l'activité humaine et joue de facto un rôle societal majeur. Elle est étroitement liée à d'autres domaines importants, tels que l'électronique, la mécanique, les sciences de l'information et de la communication, la chimie, les sciences du vivant et maintenant à l'environnement.

La compréhension et le contrôle des processus optiques constituent un véritable challenge qui vise au développement de nouvelles fonctions optiques avancées tirant parti des propriétés de la lumière dans différents milieux. Les principaux champs d'investigation portent sur les télécommunications optiques, le traitement tout optique de l'information, les nouvelles sources lasers et nouveaux maté-

riaux, la nano-optique, les applications militaires et spatiales et la biophotonique. Les travaux de recherche s'appuient sur des études fondamentales dédiées à des phénomènes non-linéaires et ou quantiques originaux, notamment dans le domaine de l'optique guidée et de la nano-optique.

Dans le secteur des communications optiques, si la fibre reste le moyen de transport de l'information privilégié, les dispositifs d'extrémités demeurent très souvent électroniques et le tout-optique est l'un des principaux enjeux des recherches actuelles et futures. Ainsi de gros efforts sont déployés visant au développement de fonctions optiques avancées et de micro- et nanodispositifs photoniques innovants, à base de nouveaux matériaux facilitant l'intégration.

Les paragraphes suivants ne dressent pas un panorama exhaustif des études dans ce domaine tellement elles sont nombreuses et variées, mais met plutôt l'accent sur quelques problématiques importantes en terme de pluridisciplinarité et d'applications. On peut y constater la place importante de la nano-optique et celle croissante de l'optique dans les sciences du vivant.

## **Lasers, optique dans les solides et matériaux pour l'optique**

Les challenges laser actuels sont multiples, sources de plus en plus puissantes, rapides, compactes (nanolasers), agiles en longueurs d'ondes, à très faible bruit ou à très haute cadence. Ainsi la course à la plus haute puissance est en route avec le développement de laser 10 PW (projet national ILE) et à plus long terme ELI (100 PW), le projet SOLEIL, le laser Megajoule. En 2009, des lasers produisant jusqu'à 1 PW avec typiquement des durées d'impulsions de 100 fs et des énergies de 10 J sont disponibles pour les utilisateurs. Le développement de sources lasers délivrant des impulsions de plus en plus courtes est un secteur également en pleine effervescence ouvrant la voie à de nouveaux domaines de recherches où des processus électroniques ultra rapides

peuvent être sondés avec une résolution temporelle attoseconde ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ). Cette échelle de temps est caractéristique des transitions électroniques entre états d'un atome ou d'une molécule en interaction avec un champ extérieur. Une telle résolution temporelle est devenue accessible grâce à la mise au point de nouvelles sources pulsées de rayonnement XUV, basées sur l'émission de rayonnement harmonique par un système quantique soumis à une impulsion pompe d'un laser IR. Une des très excitantes retombées attendues est, *in fine*, de pouvoir imager en temps réel l'évolution d'une fonction d'onde moléculaire au cours d'une transformation chimique, en atteignant une cadence de prise de vues supérieure à  $10^{15}$  images/s.

De l'autre côté, des systèmes beaucoup plus compacts sont développés. Ils sont moins énergétiques, mais de plus haute cadence (jusqu'au kHz) et avec des propriétés de faisceaux uniques: stabilisation en phase, durée de quelques cycles optiques (quelques fs), mise en forme temporelle et spatiale.

La réalisation de lasers Raman entièrement fibrés ou de lasers à fibres à base d'ions métalliques ou terres rares pour la conversion de longueur d'onde est un enjeu important qui vise à réaliser des sources lasers pour diverses applications (télécommunications, biomédicales, etc.). Ces recherches ont vu l'émergence de nouvelles activités expérimentales: élaboration et caractérisation de fibres optiques en verre de chalcogénures et développement de micro et nano résonateurs à fibres optiques étirées.

Un fort investissement a été consacré à la mise en place de moyens d'élaboration de fibres à cristal photonique. Les efforts actuels portent sur le développement d'une méthode originale permettant le dopage de verres réalisés par OVD ou MCVD par des ions terres rares ou des ions métalliques.

Parallèlement à ces solutions fibrées, des solutions basées sur des cristaux massifs, particulièrement adaptés aux fonctionnements très énergétiques suscitent toujours un grand intérêt notamment pour des débouchés militaires ou pour la spectroscopie LIBS. De nouveaux

lasers plastiques voient également le jour avec l'exploration de matériaux, organiques ou hybrides organiques-inorganiques, et d'architectures laser originales, inspirées des diodes laser inorganiques ou à base de cristaux photoniques, pour réduire le seuil des lasers organiques pompés optiquement et aller ainsi vers le pompage électrique.

L'étude de la propagation de la lumière en milieu aléatoire constitue un axe majeur de recherche avec pour challenge le développement de lasers aléatoires sans cavité, dont l'effet de piégeage des photons est provoqué par de la diffusion multiple.

La spectroscopie femtoseconde constitue un outil majeur en pleine évolution. Le couplage de la communauté de l'optique non-linéaire avec les physiciens du solide, les chimistes et les biologistes, est dans ce domaine particulièrement évident. Un exemple peut être trouvé dans le domaine des semi-conducteurs qui est fortement marqué par l'électronique de spin, où l'information est portée non plus seulement par la charge, mais aussi par le spin de l'électron. Les méthodes optiques, qui permettent l'excitation d'électrons polarisés, y sont au cœur des mesures de dynamique de spin. Dans les matériaux métalliques, ces méthodes de spectroscopie ultrarapide ont permis l'étude des premières étapes des relaxations électroniques, alors que dans les cristaux photoniques elles permettent une compréhension accrue et une utilisation des modes lents de la lumière. Le femtomagnétisme est enfin un domaine récent, en pleine évolution, dont les résultats sont très prometteurs. Les méthodes de spectroscopie linéaire comme ultra-rapide s'effectuent principalement en moyenne d'ensemble, sur des échelles spatiales macroscopiques ; elles voient maintenant leur extension vers des mesures effectuées sur des nano-objets uniques, complétant les techniques de micro-luminescence déjà largement répandues.

Enfin, un véritable défi s'ouvre pour la maîtrise de matériaux à bandes interdites ou méta-diélectriques permettant de couvrir des zones extrêmes du spectre, d'augmenter l'efficacité de conversion ou génération de lumière

et d'obtenir des micro ou nanosources efficaces, notamment basées sur des émetteurs uniques. Les nanotubes de carbone mono-feuillets mobilisent actuellement d'importants efforts de recherche notamment pour la réalisation de futurs dispositifs électroniques. En fonction de l'angle d'enroulement un nanotube peut être soit métallique soit semiconducteur. Ce lien entre propriétés structurale et électronique fait des nanotubes des candidats fascinants pour l'électronique et la spintronique moléculaire.

### **Optique de champ proche, nanooptique, plasmonique et nanoélectronique moléculaire**

La compréhension de l'interaction de la lumière avec la matière aux échelles nanométriques est un problème fondamental de la nanooptique et de la nanophotonique. Parmi les grands axes de la nanooptique, on peut citer la plasmonique qui exploite les résonances électroniques entre le champ lumineux et les surfaces des métaux, les cristaux photoniques et les nanosondes optiques utilisées en champ proche optique.

La microscopie en champ proche demeure un domaine très actif et de nouvelles voies de recherche se sont mises en place avec notamment le développement d'actions transversales permettant de concevoir, réaliser et étudier des micro- ou nano-structures innovantes (structures en semi-conducteur, micro-cavités, cristaux photoniques sur substrat, nanoparticules) permettant d'optimiser l'interaction non-linéaire. Qu'il s'agisse d'effets de confinement ou d'exaltation, les propriétés optiques de nanoparticules métalliques ou semi-conductrices dépendent fortement de leurs tailles, géométrie et environnement. Un grand nombre d'applications reposent sur ces propriétés, allant de marqueurs et capteurs biologiques, amélioration de cellules photovoltaïques et de LED à des guides d'ondes plasmoniques. Récemment, de nombreuses avancées ont été réalisées, tant du point de vue conceptuel que de la réalisation et de

l'observation de nanostructures optiques originales.

Le contrôle du confinement du champ électromagnétique dans des structures spécifiques a ouvert la voie à des études de forces optiques induites par ces forts confinements de champs électromagnétiques. La mesure des forces induites par un champ électromagnétique localisé dans des cavités à cristaux photoniques par exemple constitue un objectif majeur. Le contrôle de ces forces pourrait être à la base de manipulation de nanoparticules par exemple.

De forts confinements latéraux de la lumière peuvent être également obtenus par étirage de fibre optique. L'étude de guides à section sub-longueur d'onde est un thème en plein développement. Les potentialités applicatives sont multiples : fonctions de traitement tout-optique du signal, interconnexions optiques ultra-compactes, capteurs et lasers miniaturisés. La technologie de fabrication des dispositifs à microfibres est encore balbutiante, et les performances de ces dispositifs seront largement dépendantes du matériau constituant. Si l'emploi de la silice est relativement bien maîtrisé, le développement de microfibres à partir de composés fortement non-linéaires représente un enjeu considérable. Les micro- et nanofibres constituent ainsi une nouvelle plate-forme idéale pour la génération d'effets non-linéaires dans un environnement de forte compacité.

L'étude d'assemblage par champ évanescent de nanocavités optiques sur puce de silicium suscite un grand intérêt. De tels nanosystèmes optiques compatibles avec les technologies silicium de la microélectronique ont un fort potentiel en termes d'applications pour le traitement tout optique de l'information sur puce. Un des enjeux majeurs dans ce domaine réside dans la réalisation de nanosystèmes pour le ralentissement et le confinement de la lumière.

Les activités de recherches relevant de la dénomination générique de « plasmonique » couvrent en fait des domaines extrêmement variés allant de la biophotonique à l'inter-

connexion optique. Cet état de fait résulte de l'existence de différents types de modes plasmons. De manière schématique on distingue les modes plasmons localisés supportés par des nanoparticules métalliques des modes plasmons d'interfaces délocalisés qui se développent typiquement à la surface d'un film métallique. Le domaine d'applications privilégié des modes plasmons localisés reste la biophotonique au travers du développement de biocapteurs. De tels biocapteurs exploitent des propriétés spécifiques des modes plasmon localisés tels que la diffusion Raman amplifiée. Notons toutefois que depuis quelques années, l'usage des nanoparticules métalliques dépasse largement le cadre de la simple biodétection pour entrer dans celui de la thérapie. À titre d'exemple, il a été démontré récemment que l'échauffement des nanoparticules métalliques qui sont le siège de modes plasmon localisés peut être utilisé pour détruire in-vivo et spécifiquement des cellules cancéreuses.

Les modes plasmons d'interfaces (délocalisés) présentent aussi un intérêt dans le contexte des biocapteurs, toutefois les applications les plus récentes et disruptives de ces modes concernent le domaine du transfert de l'information à courte distance. Ainsi, la juxtaposition de la technologie silicium et de composants plasmoniques constitue un axe de recherche particulièrement actif pour le développement de composants passifs autorisant le routage de l'information à très haute cadence.

La nanoélectronique moléculaire est un thème interdisciplinaire qui couvre la physique, la chimie et la science des matériaux. L'élément unificateur est le recours à des nanoobjets tels que molécules, nanoparticules, nanotubes, nanofils, agrégats, etc. pour concevoir des fonctions équivalentes à celles des transistors, des diodes, des commutateurs et autres composants utilisés en microélectronique sur silicium. Le concept de l'électronique moléculaire fait l'objet d'une attention croissante depuis plusieurs années en raison de la perspective de réduction de la taille en électronique, grâce au contrôle des propriétés à l'échelle moléculaire. Le développement de fonctions complexes grâce à cette nanoélectro-

nique passe par la compréhension et l'utilisation des propriétés quantiques des nanoobjets, la mise au point de technologies de manipulation collectives (auto-assemblage) et la mise au point de technologies d'interfaçage entre les nanoobjets et le monde macroscopique. L'étude de la cohérence et du contrôle quantiques dans de tels nanoobjets constitue un des enjeux majeurs de la discipline. Les nanomachines moléculaires sont des défis cognitifs porteurs de nombreuses applications.

### **Optique quantique, optique non-linéaire, optique ultrarapide, dynamique non-linéaire optique et communications optiques**

Les états non classiques de la lumière, l'électrodynamique quantique en microcavité, l'optique non-linéaire en microcavité et autres structures artificielles susceptibles d'en exalter les effets telles que les valves à cristaux liquides, le confinement optique et électronique dans des nanostructures (fils et boîtes quantiques), les solitons de cavité, sous-tendent un vaste ensemble d'effets dont les retombées scientifiques et applicatives, tant pour le traitement quantique de l'information que pour les communications optiques, soulèvent actuellement un grand intérêt. On vise ici à l'élaboration de nouveaux concepts susceptibles de produire des ruptures technologiques à moyen et long terme comme par exemple les sources à photons uniques ou les sources à états intriqués, les fonctions optiques à bruit comprimé, les composants d'émission à haut rendement quantique, les mémoires optiques. Les aspects de dynamique qui éclairent les limites fondamentales de rapidité de dispositifs mettant en œuvre ces concepts sont un volet important de cette thématique.

La dynamique non-linéaire des résonateurs passifs et actifs injectés ou couplés, de complexité élevée, constitue un domaine d'une grande richesse. Ceci est vrai tout d'abord par le nombre de processus non-linéaires qui peuvent y prendre naissance. La relation que la dynamique non-linéaire

optique établit avec les processus dynamiques se produisant notamment en chimie et en biologie et la compréhension qu'elle permet éventuellement de développer de ces processus complexes contribue également à l'intérêt croissant du domaine.

Des recherches récentes ont permis de mettre au jour des phénomènes non-linéaires originaux, comme les similaritons optiques, les ondes scélérates, l'attraction de polarisation ou les solitons incohérents. L'exploitation des solitons dissipatifs pour le traitement tout optique de l'information constitue un axe majeur avec notamment la génération de « molécules solitons » et de « balles de lumière ». Un nouveau domaine original est dédié à l'optique non-linéaire incohérente abordée au niveau théorique par une approche statistique basée sur une formulation thermodynamique hors équilibre (processus de condensation de type Bose-Einstein avec des ondes optiques classiques).

Le domaine des communications par fibres optiques à ultra hauts débits (160 Gbit/s et plus) s'est orienté vers la génération de trains d'impulsions à très haute cadence, la régénération tout optique des impulsions, le développement de nouvelles fonctions tout optiques de traitement du signal (contrôle de la polarisation en particulier), la génération de supercontinuuums et l'optimisation de nouveaux formats de codage de l'information (CDMA optique). Les solitons et l'optimisation de lignes de transmission à gestion de la dispersion suscitent de nombreuses études.

### **Biophotonique et neurophotonique, spectroscopie multidimensionnelle et microscopies optiques non-linéaires**

La biophotonique est une discipline récente associant optique et photonique à la biologie pour la compréhension des fonctions biologiques et de leurs exploitations à des fins médicales, thérapeutiques et préventives. C'est un domaine transdisciplinaire en forte expansion relevant de la physique (optique, photonique), de la chimie (spectroscopie, chromophores, nanomatériaux), de la biolo-

gie, de la biochimie, de la médecine (ADN, protéines, cellules, tissus, organismes), de l'ingénierie (instrumentation) et de l'éthique.

La bio-photonique connaît depuis plusieurs années une expansion particulièrement impressionnante, tant au niveau des approches physiques employées que des questions biologiques abordées. Les méthodes de détection optiques ont le grand avantage d'être non-invasives et de donner accès aux propriétés spectroscopiques et/ou dynamiques (mesures résolues en temps) des objets étudiés, ultimement jusqu'à l'objet nanométrique individuel tout en renseignant sur les conditions environnementales des objets étudiés. Celles couramment utilisées sont basées sur l'excitation de fluorescence (intrinsèque ou à l'aide de marqueurs extrinsèques) qu'elles opèrent dans le régime linéaire ou non-linéaire. Des approches qui permettent d'obtenir des résolutions sous la limite de diffraction (champs proche, microscopie  $4\pi$ , détection de particule unique, illumination structurée...) ont vu le jour récemment, que ce soit pour l'étude de systèmes biomimétiques ou de la matière vivante.

Ces dernières années, la nécessité d'intégrer des fonctionnalités optiques dans des laboratoires sur puce (métrologie au niveau cellulaire), a permis également d'approfondir et d'innover dans le biomédical grâce à la photonique (sources supercontinuum pour la microscopie confocale et pour la spectroscopie résolue en temps de tissus osseux, biocapteurs pour les allergènes, sondes de mesures de fluorescence, tomographie optique, etc.). Actuellement, le thème microfluidique et nanostructures pour la biologie connaît un fort développement.

Le repliement des protéines reste un sujet d'actualité en biophysique, étudié notamment par des techniques de mesure du dichroïsme circulaire résolu en temps qui offrent une alternative originale aux mesures habituelles d'absorption infrarouge. Parmi les autres techniques d'analyse la spectroscopie multidimensionnelle a connu ces dernières années un essor considérable, tout particulièrement dans le domaine infrarouge en raison de son impor-

tance pour l'étude de la dynamique vibrationnelle de molécules chimiques ou biologiques.

Un domaine émergent de la biophotonique concerne la neurophotonique. Il s'agit, à travers des systèmes optiques de transillumination, d'étudier un tissu vivant perfusé et mesurer des propriétés ou des variations des propriétés physico-chimiques situées à l'intérieur de ce tissu par des voies optiques. L'utilisation de méthodes optiques avancées, combinées à l'utilisation de molécules optogénétiques, est sur le point de devenir un outil efficace pour explorer une large gamme de mécanismes cérébraux allant jusqu'à l'étude du comportement d'animaux éveillés et permettant dans un avenir proche une imagerie fonctionnelle tout-optique du cerveau.

La microscopie optique non-linéaire s'est aujourd'hui établie comme la méthode de référence pour l'observation tridimensionnelle de tissus biologiques intacts. Récemment, l'utilisation de signaux non-linéaires endogènes basés sur la fluorescence, la génération d'harmoniques (dans des nanocristaux par exemple), ou le mélange de fréquences (CARS notamment), a permis d'observer les tissus avec ou sans marquage exogène. L'analyse de l'origine physique de ces signaux a permis d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation comme l'observation tridimensionnelle dynamique de la morphogenèse embryonnaire, l'imagerie de la matrice extracellulaire collagénique, de l'accumulation de lipides ou d'eau dans les tissus, ou de la microstructure de milieux fortement organisés comme la cornée oculaire. D'un point de vue méthodologique, des avancées technologiques importantes ont été effectuées comme l'application du contrôle cohérent en microscopie non-linéaire pour exciter sélectivement une molécule, l'introduction de l'optique adaptative pour améliorer la qualité d'imagerie en profondeur, et le développement de nouveaux imageurs fonctionnant dans la gamme TeraHertz. Le domaine de suivi de biomolécules uniques connaît un grand essor avec le développement de techniques d'observation d'un très grand nombre de molécules uniques (microscopie dite de super-résolution). Par ailleurs, de nouvelles

sondes fluorescentes sensibles à l'environnement cellulaire (pH, concentrations ioniques) ont vu le jour et connaîtront sans doute à l'avenir un fort développement, notamment par l'emploi de nanoparticules dopées avec des terres rares ou des nanocristaux semi-conducteurs. Ces nouveaux outils optiques ultrasensibles permettent la détection d'objets à l'échelle individuelle et sont utilisés pour l'analyse de processus biologiques, tel que les interactions ADN-protéines ou le mouvement de protéines membranaires et de moteurs moléculaires en cellules vivantes.

## **2.5 PLASMAS CHAUDS : VERS LA PRODUCTION D'ÉNERGIE PAR FUSION CONTRÔLÉE**

Les dernières années ont vu l'attribution régulière de postes de recherche sur la thématique des plasmas chauds magnétisés aussi bien au CNRS que dans les universités. Cette tendance positive doit être maintenue et participe de l'engagement du CNRS dans la recherche sur les énergies non-carbonées. Dans le contexte international, la décision de construire ITER à Cadarache implique fortement la France pour assurer le succès de cette entreprise. Les nombreux développements du projet dans cette phase initiale soulignent l'importance de développer la recherche fondamentale associée dans tous les domaines de la connaissance, technologique, expérimentale et théorique. Combiné à l'aspect pluridisciplinaire, le programme de fusion par confinement magnétique s'inscrit ainsi clairement dans les missions du CNRS. La communauté scientifique nationale associée sur cette thématique de recherche, CEA, CNRS, INRIA, université s'est structurée au niveau national autour du Master Fusion et de la Fédération de Recherche Nationale sur la Fusion par Confinement Magnétique. Cette dernière constitue la meilleure structure existante pour permettre à la France d'atteindre ses objectifs scientifiques vis-à-vis d'ITER. L'évolution de cette structure notamment par le déve-

loppement d'un financement national est nécessaire. Les investissements doivent s'orienter selon trois directions, le support aux « petits » dispositifs expérimentaux qui trouvent leur place dans les universités, le support à des diagnostics développés par le CNRS sur les dispositifs expérimentaux lourds comme Tore Supra (CEA Cadarache), JET (Euratom, Culham), voire d'autres dispositifs en Europe, le développement de calculateurs intermédiaires permettant aux équipes de modélisation de préparer les calculs en vue de l'utilisation des supercalculateurs (High Performance Computers ou HPC). Dans le domaine des petites expériences une réflexion sur le besoin et la mutualisation des compétences des organismes impliqués dans la fusion par confinement magnétique doit déboucher sur une meilleure complémentarité et une plus grande pertinence de ces dispositifs. La participation aux expériences sur les grands tokamaks par la mise en œuvre de diagnostics par les équipes du CNRS est un point de passage pour la visibilité de l'établissement aussi bien au plan national qu'international. Une réflexion pour implanter une équipe CNRS au côté du CEA sur le site d'ITER doit être engagée et devrait donner un maximum d'efficacité à la France dans l'accompagnement d'ITER. La participation à la mise en œuvre de calculateurs intermédiaires est une nécessité qui dépasse le cadre de la fusion et vise à accompagner une mutation dans l'étude des systèmes complexes par les simulations numériques. Enfin, l'organisation très flexible du CNRS peut lui permettre de jouer un rôle actif dans le développement des collaborations internationales, en Europe et avec les partenaires d'ITER (Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie) d'une part, mais surtout avec les pays en dehors du cadre d'ITER, le meilleur exemple étant le Brésil. En conclusion, la part croissante du CNRS dans la recherche sur la fusion magnétique contrôlée doit s'accompagner d'une politique d'investissement et d'une participation croissante non seulement dans la recherche mais aussi dans l'orientation de la recherche pour permettre à la France de répondre au déficit d'ITER dans le cadre d'une collaboration internationale sur les énergies non carbonées.

Le contrôle de la fusion thermonucléaire constitue l'une des clés d'un grand défi scientifique de ce siècle, celui d'un avenir énergétique à la fois pérenne et sûr. Deux filières sont aujourd'hui explorées : la fusion par confinement magnétique (FCM - tokamak) et la fusion par confinement inertiel (FCI - laser), et deux TGE (très grands équipements), ITER et le LMJ, sont actuellement en construction sur le sol français. En relation avec le CEA, le CNRS contribue activement, et ce depuis plus d'une trentaine d'années, à la recherche amont nécessaire au succès de ces projets. Il a développé pour la filière FCM des programmes d'accompagnement qui recouvrent notamment l'exploitation d'un parc d'installations de taille plus modeste, moins coûteuses, plus polyvalentes et plus souples, donc mieux adaptées aux besoins de formation, à l'expérimentation « par parties » et à l'innovation ; la théorie et la modélisation ; des études connexes en particulier sur les matériaux et la physique atomique, etc. La conception de diagnostics pertinents, si possible non intrusifs, d'analyse des plasmas de fusion constitue un enjeu important. Ils peuvent reposer sur la mise en œuvre de sources secondaires, comme par exemple les diagnostics micro-ondes développés sur Tore Supra pour des mesures de fluctuations ou les récents développements autour des applications interférométriques des faisceaux « laser X » ou de protons créés par laser, ou sur des techniques spectroscopiques. La physique atomique (émissivités et opacités, profils de raies) des plasmas chauds fortement rayonnants ou fortement couplés joue alors pour ces dernières un rôle déterminant. Dans chacune des filières, l'émergence de grands équipements orientent la recherche vers une plus grande intégration des connaissances en privilégiant des approches globales et/ou multi-échelles.

## Filière magnétique

Les plasmas d'ITER seront sensiblement différents des plasmas produits dans la génération actuelle de tokamaks. Cette évolution aura un fort impact sur les sujets traditionnellement traités (interaction plasma-paroi et plasmas de

bord, magnétohydrodynamique, turbulence et transport associé, diagnostics non intrusifs) dans les unités mixtes CNRS/Universités. Une différence essentielle tient au chauffage du plasma par les particules issues des réactions de fusion. En conséquence, l'étude des propriétés de confinement et de stabilité d'un plasma en régime de combustion constituera un axe majeur de recherche du programme scientifique d'ITER. Par ailleurs, la montée en puissance d'ITER orientera la recherche sur les plasmas chauds vers une plus grande intégration portée par une approche globale et une prise en compte plus fine de la dynamique des électrons. Le couplage au plasma de la puissance radiofréquence injectée par des antennes est aussi essentiel pour réaliser les conditions nécessaires aux réactions de fusion. Enfin, la limite en flux thermique admissible des éléments de première paroi, ainsi que les contraintes d'érosion et de contrôle des particules, imposent de réaliser des plasmas denses et rayonnants dont la physico-chimie est complexe. Les principaux enjeux en physique des plasmas magnétisés sont multiples : l'étude des instabilités magnétohydrodynamiques en régime non-linéaire et de l'impact d'une population de particules énergétiques sur leur croissance ; le développement de méthodes de contrôle ; la théorie, la modélisation (en particulier les simulations cinétiques dans le cœur du plasma ou fluides dans les régions périphériques collisionnelles) et l'étude expérimentale du transport turbulent dans des régimes de température élevée ; la compréhension de la propagation d'ondes radiofréquence et de leur dépôt de puissance dans un plasma en régime de combustion (traitement correct de l'interaction antennes-plasma, etc.) ; l'analyse du comportement des éléments de première paroi sous irradiation (érosion, rétention du tritium, tenue des matériaux, etc. pour des flux intenses de particules chargées et de neutrons). À la différence des sujets propres au plasma où l'effort doit s'orienter vers une description globale, la physique de la paroi s'inscrit dans une approche multi-échelles.

## Filière inertielle

La fusion par confinement inertiel connaît également des progrès importants avec la mise en service du laser américain NIF (National Ignition Facility), et la poursuite de la construction du laser LMJ près de Bordeaux, qui devrait être opérationnel en 2015. La première démonstration de production d'énergie par fusion inertielle avec un gain supérieur à 10 est attendue vers 2012 sur le NIF, ce qui marquera un jalon historique dans cette approche. En parallèle avec la démarche du NIF centrée sur l'attaque indirecte, de nouveaux schémas d'allumage en attaque directe sont largement étudiés : l'allumage « rapide », assisté par un laser pétawatt, et l'allumage par choc, avec des enjeux scientifiques importants, comme le contrôle en énergie des faisceaux d'électrons créés par laser pétawatt, et surtout les modalités de propagation du laser dans un plasma préformé. Ces approches requièrent un grand nombre d'études préalables de physique fondamentale sur l'accélération et le transport de particules rapides (électrons, protons, ions...), les instabilités hydrodynamiques ou de faisceaux, les plasmas chauds et denses magnétisés...

Une collaboration à l'échelle européenne, le projet HiPER, vise ainsi à démontrer la capacité de la fusion inertielle pour la production d'énergie à l'échelle industrielle. Ce programme européen est d'abord un formidable défi de technologie laser, essentiellement sur le pompage par diodes. C'est aussi un défi pour la physique de la fusion inertielle, qui doit tout d'abord s'appuyer sur les capacités expérimentales du laser MégaJoule et du laser pétawatt PETAL associé ; mais aussi sur un réseau européen d'installations laser de plus petite taille, mieux adaptées à la recherche de par leur souplesse et leur disponibilité de temps de faisceau.

Ces installations doivent comprendre des systèmes dans une gamme énergétique de une à quelques centaines de joules, des installations de gamme kilojoule comme LULI2000 et enfin, une installation dans la gamme de 10 kJ serait indispensable à l'échelle européenne, à l'instar du système Omega à Rochester.

## États extrêmes de la matière

Les éclaircissements et les puissances atteints ces dernières années par les lasers de haute intensité, soit seuls soit couplés à un laser de haute énergie, ouvrent la porte à l'étude de nouveaux phénomènes physiques, souvent aux interfaces entre domaines. Le paysage français sera dominé par deux grands instruments en cours de construction, qui devraient être opérationnels vers 2015 : le laser Pétawatt PETAL à Bordeaux, et le laser de haute puissance APOLLON sur le plateau de Saclay, accompagnés d'un réseau de lasers de haute intensité à l'échelle nationale. Grâce à l'ensemble de ces systèmes de pointe, des progrès importants dans plusieurs domaines liés à l'interaction laser-matière à haute intensité ont été récemment obtenus, ou sont attendus prochainement.

Ainsi, l'accélération de particules par laser en milieu plasma est un sujet en plein essor. Il est aujourd'hui possible de produire par accélération laser des paquets d'électrons stables, accordables en énergie, en charge, et en dispersion en énergie jusqu'à un niveau d'environ 1%. Une application phare de ces électrons accélérés par laser serait le développement d'un laser à électrons libres compact à courte longueur d'onde, par couplage avec un onduleur.

L'accélération de protons et d'ions par laser est également très étudiée ; la compréhension de l'accélération et du transport de ces particules chargées dans un milieu hétérogène peut alors donner lieu à des applications interdisciplinaires, en chimie, biologie ou médecine.

Plus généralement, les rayonnements particulaires et électromagnétiques issus de l'interaction, des THz aux X durs, sont généralement très brefs et apparaissent comme des outils uniques pour sonder la dynamique ultra-rapide de la matière. Citons l'utilisation de la protographie pour mesurer les champs électriques ou magnétiques de plasmas ; les nouvelles possibilités d'absorption X près des seuils résolue en temps pour sonder l'évolution d'un ordre local ; les études de la dynamique des constituants internes des atomes avec une résolution femtoseconde ; le contrôle de l'excitation de molécules et de réactions

chimiques et la création de hautes densités d'excitations électroniques dans des diélectriques. La résolution la plus extrême correspond au domaine en plein essor de la physique attoseconde, grâce à des techniques de plus en plus évoluées pour contrôler le champ électrique d'un laser à l'échelle d'un seul cycle optique, ou permettant d'utiliser le phénomène même de génération d'harmoniques élevées comme sonde tomographique d'orbitales moléculaires.

Les impulsions laser à ultra-haute intensité et fortement focalisées mènent à des éclairissements ultra-relativistes; des phénomènes exotiques de physique sont alors prédits, par exemple en électrodynamique non-linéaire.

Ces phénomènes relativistes devraient prochainement mener à l'apparition de nouvelles sources de rayonnements de très courte longueur d'onde. Une possibilité nouvelle est d'utiliser les lasers à électrons libres X (European XFEL, LCLS) comme lasers intenses de très courte longueur d'onde, susceptibles de créer des phénomènes complètement nouveaux, des atomes aux plasmas.

Enfin, le couplage entre hautes intensités et physique à haute densité d'énergie ouvre aussi des champs de recherches majeurs, comme l'étude de la matière dense et tiède, l'étude des conditions prévalant au cœur des planètes et des étoiles ou la physique nucléaire dans les plasmas laser.



# 05

---

## MATIÈRE CONDENSÉE : ORGANISATION ET DYNAMIQUE

*Président de la section*  
Philippe GOUDEAU

*Membres de la section*

David BABONNEAU

Lydéric BOCQUET

Serge BOUFFARD

Florent CALVAYRAC

Marc DE BOISSIEU

Michel DROUET

François GALLET

Alessio GUARINO

Pascale LAUNOIS

Jacques LE BRUSQ

Pierre LEVITZ

Nadine MEHL

Roland PELLENQ

Geoffroy PREVOT

Anne RENAULT

Christian RICOLLEAU

Hermann SELLIER

Martine SOYER

Odile STEPHAN

Damien VANDEMBROUCQ

Il est dit que l'écriture du rapport de conjoncture fait partie des prérogatives du comité national. La section s'est néanmoins interrogée sur l'impact de ce rapport de conjoncture sur les prises de décision des tutelles. Ce travail, qui ne faisait pas partie de nos tâches prioritaires, est le reflet de nos doutes. Il est écrit dans l'urgence à plusieurs mains sur la base de ce qu'avaient fait nos vaillants prédécesseurs.

La section 05 est l'une des sections les plus interdisciplinaires des 40 sections que compte le comité national. Traditionnellement ouverte vers la chimie (section 19 puis 15 pour la chimie des matériaux et section 11 pour la matière molle) et la mécanique (section 9), elle a évolué très rapidement vers les sciences de la terre et les sciences du vivant. Longtemps centré sur la détermination des structures cristallines et sur l'étude des liens structure-propriétés, le domaine couvert par la section 05 s'est considérablement diversifié. La matière condensée est étudiée dans tous ses états (cristaux, verres, liquides, etc.), sous toutes ses formes (matériaux massifs et leurs surfaces, milieux divisés – poreux, granulaires – et inhomogènes, nano-objets et hétéro structures, etc.), à différentes échelles spatiales et temporelles (nano-, méso- et macro-, de la picoseconde à des temps longs) et en toutes conditions (température et pression extrêmes, sous irradiation, sous sollicitations mécaniques, électriques, magnétiques, etc.).

Nous avons découpé ce rapport en trois sections, les deux premières étant relatives aux principaux sujets de recherche abordés par la communauté, ceux traditionnellement ancrés au cœur de la section 05 et ceux interdisciplinaires plus récents et la troisième étant consacrée à l'évolution des méthodes et techniques d'études. Cette introduction se terminera par des considérations générales relatives au fonctionnement de la recherche en France au travers du financement, de l'évaluation et de la parité.

## **Matière condensée aux petites échelles**

Cette première section débute par quelques remarques sur l'évolution des objets étudiés et ses conséquences sur les méthodes nécessaires à leur analyse. En particulier, l'évolution depuis une dizaine d'années vers l'étude de systèmes de très faibles dimensions a été spectaculaire et sera durable. D'un point de vue structural, la cristallographie est indispensable, à la fois à l'identification des nouvelles phases aux faibles dimensions et à l'étude des petites et moyennes molécules organiques et jusqu'aux macromolécules. Le développement toujours croissant des études sous conditions extrêmes et des mesures résolues en temps – qu'autorisent les nouvelles sources de rayonnement – enrichit beaucoup notre connaissance des diagrammes de phase et des cinétiques des transitions.

L'apparition aux échelles de longueurs nanométriques de nouveaux effets physiques et de nouvelles propriétés contribuent largement à l'intérêt pour les nanomatériaux.

Nous distinguerons :

- les nano-objets isolés
- les surfaces nano- structurées
- la science des matériaux

## **Matière condensée dite mal organisée**

Cette rubrique concerne les matériaux désordonnés (verres, granulaires), la matière

dite « molle » (gels, systèmes colloïdaux, cristaux liquides) et les systèmes biologiques, qui présentent des diagrammes de phases, des dynamiques, des propriétés mécaniques et de transport très complexes. Elle met en valeur l'ouverture des thématiques de la section 05 vers la matière dite moins organisée vers laquelle sont allés des chercheurs et des unités issus de la matière condensée.

## **Les outils de la recherche**

Les progrès de la physique de la matière condensée résultent d'allers-retours permanents entre expériences, modélisation théorique et, de plus en plus, simulations numériques. Nous insistons sur l'importance de l'instrumentation avant de faire un point sur les développements récents et sur l'apport des méthodes numériques.

## **Les moyens de la recherche**

Les changements importants apparus dès 2005 dans le financement de la recherche ont des répercussions non négligeables sur l'organisation de la recherche et les laboratoires.

En particulier si l'ANR a effectivement permis de développer de nouveaux projets on peut s'interroger sur : (i) les conséquences sur l'organisation des laboratoires en interne puisque le financement d'équipe est privilégié. Il semble important qu'une partie du « préciput » revienne aux laboratoires ; (ii) Le manque de souplesse, le suivi pointilleux et le manque d'autonomie mis en place par l'ANR qui a copié les moins bonnes pratiques qui existent au niveau Européen. S'inspirer des conseils mis en avant par l'ERC (financement sur 5 ans, évaluation à postériori, flexibilité dans le management des fonds requis) serait certainement une très bonne idée.

Force est de constater de manière générale une augmentation des financements sur contrats (ANR, financements CNano, RTRA, régions, etc.) au détriment des crédits récur-

rents. Nos moyens sont croissants certes, mais via des appels d'offre. Nous sommes devenus pour la plupart d'entre nous des chercheurs... de contrats! Nous consacrons une partie non négligeable de notre temps à définir des programmes de recherche à court terme (3 ans). Cette démarche est incompatible avec des activités de recherche scientifique de fond qui s'étalent généralement sur le long terme.

Les programmes permettent de plus en plus le financement de stages postdoctoraux. Il y a là un « plus » en termes de nombres de têtes et bras évident à court terme mais surtout un revers : (a) de plus en plus de précaires – les post-docs- et donc un métier moins attractif pour les jeunes (et moins accessible aussi pour les femmes), et (b) obligation aussi ici pour le chercheur permanent de définir des objectifs à court terme.

## L'évaluation de la recherche

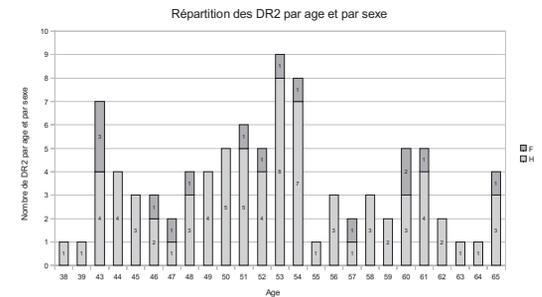
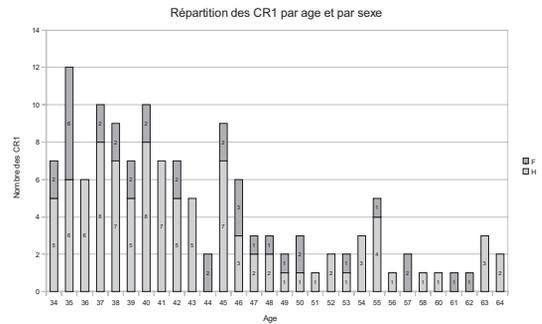
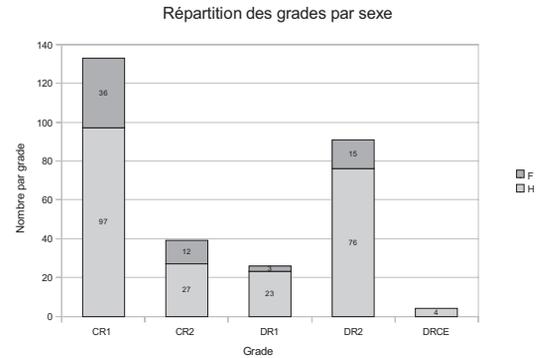
La mise en place en 2008 de l'AERES, agence d'évaluation des laboratoires, formations et organismes, a des répercussions néfastes sur le bon fonctionnement du comité national. En particulier ses prérogatives en matière d'évaluation des laboratoires pour leur association ou non au CNRS ont *de facto* fortement diminué. La section 05 estime que l'évaluation des chercheurs doit se faire dans le contexte de leur laboratoire. En conséquence, l'évaluation des laboratoires et l'évaluation des chercheurs sont indissociables.

## La parité

Concernant la répartition des femmes et des hommes dans la section 05, on constate des disparités très nettes au passage DR2 (27% de femmes CR1 – 16,5% DR2) qui s'accroissent hélas encore aux niveaux DR1 (11%) et DRCE (0%). Les graphes ci-après permettent de mieux apprécier ces déséquilibres. Il y a visiblement une auto censure au concours DR2 puisque seulement 19% des femmes CR1 postulent (concours 2010). Pour les concours

CR, on constate que le rapport hommes/femmes des candidatures est sensiblement le même que celui des recrutements (autour de 20% en 2010). C'est loin d'être le cas pour toutes les sections et en particulier au sein de l'INP CNRS.

La composition des jurys de recrutement ou des instances d'évaluation est très certainement un élément à prendre en compte si l'on souhaite agir pour la parité.



# 1 – MATIÈRE CONDENSÉE ÀUX PETITES ÉCHELLES

## 1.1 STRUCTURE, EXCITATIONS ÉLÉMENTAIRES

### Cristallographie, détermination de structures

La cristallographie conventionnelle des macromolécules biologiques n'est plus un sujet de recherche pour les physiciens, les méthodes de détermination des structures à résolution moyenne étant bien établies et maîtrisées par les biologistes. Il est aujourd'hui possible d'obtenir, avec les synchrotrons de troisième génération, des données à résolution ultra haute (0,5 à 0,8 Å) qui doivent donner accès à la densité électronique précise et aux propriétés électrostatiques. Néanmoins, des progrès restent à accomplir pour extraire ces informations de nature électronique des données de diffraction (réduction des données, cartographie de densités électroniques, modélisation validation des modèles issus de calculs théoriques, type Density Functional Theory – DFT d'ordre  $n$ ). On peut noter ici que l'arrivée des synchrotrons de troisième génération a joué un rôle essentiel dans la détermination de structures biologiques. En quelques années, le nombre de structures biologiques déterminées par diffraction X a largement dépassé celui déterminé par RMN.

Un autre problème toujours difficile concerne les résolutions de structures à partir de données de diffraction très pauvres. Les progrès récents de la cryomicroscopie devraient apporter une solution alternative à la résolution de ce problème.

La mise en service des lasers à électrons libre qui délivreront un faisceau de rayons X durs (10 à 20 keV) cohérent, s'annonce comme une petite révolution dans le domaine de la résolution de structure. Plusieurs applications sont envisagées (voir chapitre grands instruments) mais une des applications « phare »

concernera la résolution de la structure de macromolécules ou protéines uniques. La cohérence permet de résoudre le problème de la phase et la brillance très importante permet de faire diffracter une protéine unique sans avoir besoin de la cristalliser. Une activité intense se développe en Europe, au Japon et aux USA autour de cette thématique à l'interface physique-biologie. Un investissement plus important est souhaitable en France dans ce domaine.

L'autre application de cette technique dans le domaine de la matière condensée concerne la détermination de la forme et du champ de déformation de nano-objets. Il s'agit là d'une technique très prometteuse dans laquelle quelques équipes françaises sont déjà bien investies.

La cristallographie a également énormément progressé dans le domaine de la détermination de la structure des « cristaux aperiodiques » qui englobe les phases modulées incommensurables, les phases composites incommensurables et les quasi cristaux. Les exemples de cristaux aperiodiques sont de plus en plus nombreux (minéraux, éléments simples sous pression, supraconducteurs haute température, ondes de densité de charge, alliages intermétalliques, thermoélectriques, molécules organiques, protéines...) et comprendre leur structure de manière détaillée et l'implication de l'apériodicité sur les propriétés physiques reste une question d'actualité dans beaucoup de domaines. Il est important de perpétuer et disséminer le savoir faire acquis en France dans ce domaine qui est à l'interface de l'INP et de INC du CNRS. Une bonne articulation entre la partie détermination de structure et les connaissances en « cristallographie » est indispensable dans ce domaine.

Au delà de la détermination de la structure « moyenne » à l'aide de la mesure de l'intensité intégrée des pics de Bragg, la mesure de la diffusion diffuse, un domaine qui avait fait le renom de l'école française de cristallographie avec pour tête de file André Guinier, a retrouvé un gain d'intérêt au cours des dernières années du fait de l'apparition des détecteurs bidimensionnels numériques performants. Rappelons l'importance du désordre

sur les propriétés physiques d'autre part. Avoir une compréhension fine de l'écart au réseau idéal, du désordre, est en effet essentiel dans la plupart des domaines de la matière condensée et particulièrement en science des matériaux.

De manière plus générale, une approche combinant expérience et calcul de l'énergie par modélisation à l'échelle atomique (soit par des calculs DFT ou en utilisant des Hamiltoniens phénoménologiques adaptés du type potentiels Embedded Atom Model – EAM ou autres) commence à émerger. Il y a encore peu d'exemples aboutis mais les calculs d'énergie et de la stabilité relative des structures peuvent permettre de discriminer entre des solutions conduisant à un accord similaire au niveau de l'expérience.

Les conducteurs quasi-unidimensionnels continuent de poser des problèmes subtils, dont la résolution progresse bien, grâce à l'emploi conjugué des techniques de diffusion/diffraction X et de sondes locales comme la microscopie par effet tunnel (STM) qui est capable de détecter directement une onde de densité de charge (ODC) en surface, par exemple. L'influence de défauts ou de désordre sur les propriétés reste un sujet d'actualité. Si de nombreuses études se sont attachées à comprendre l'influence de défauts ponctuels sur le comportement d'une ODC, de nouvelles orientations concernent par exemple la dynamique de ces ODC sous courant voient le jour.

## Structures et propriétés vibrationnelles

La communauté française bénéficie de la présence de spécialistes des études de la matière sous très hautes pressions. Ce domaine d'intérêt est très vaste puisque de nombreuses propriétés sont susceptibles d'être modifiées par les fortes pressions. Pour les propriétés structurales et vibrationnelles, il s'agit d'étudier :

i) l'évolution des liaisons interatomiques ou moléculaires et les transitions de phase dans différents types de composés

ii) la stabilité de la liaison chimique sous pression afin de comprendre les réactions explosives par exemple.

L'intérêt des hautes pressions pour les géologues est particulièrement à souligner puisqu'on sait réaliser en laboratoire des conditions approchant celles qui règnent dans le manteau inférieur de la Terre. On peut ainsi déterminer les structures et les domaines de stabilité (pression et température) des principaux minéraux terrestres et mesurer le tenseur des constantes élastiques qui régissent la propagation des ondes acoustiques et son anisotropie dans les géo matériaux.

Les hautes pressions sont connues pour modifier considérablement les propriétés phononiques, magnétiques et électroniques en changeant les distances interatomiques, c'est-à-dire le recouvrement des orbitales externes et la densité électronique au niveau de Fermi. Dans le domaine du magnétisme, on peut ainsi modifier la température d'ordre, la nature de l'ordre magnétique, la valeur des moments et des susceptibilités magnétiques des composés non magnétiques. À noter une évolution récente vers des expériences étendues aux hautes températures, en particulier sous l'effet de chauffage flash par laser.

Un autre point concerne l'effet des hautes pressions sur la transition vitreuse, la dynamique des verres et leurs propriétés (viscosité, etc.) ainsi que sur le processus d'amorphisation.

L'étude des liquides sous conditions extrêmes est moins avancée que celle des solides. Un champ important est à explorer : propriétés structurales et dynamiques, en relation avec la fusion ; transitions fluide-fluide, transitions cristal-amorphe ou amorphe-amorphe. D'autres projets sont plus particulièrement orientés vers la compréhension du noyau des planètes (études des alliages de fer liquide avec des éléments légers).

À signaler le besoin d'études sous conditions extrêmes des matériaux nanométriques ou nanostructurés pour mieux connaître l'influence de la pression sur les effets de taille réduite.

Les études en conditions extrêmes nécessitent un fort couplage avec les centres de

rayonnement synchrotron. Les sources de neutrons sont aussi de plus en plus utilisées, grâce à la réalisation de nouvelles presses opérant sur de plus gros volumes de matière.

## Phonons et dynamique de réseau

La dynamique de réseau est une thématique qui a vu un regain d'intérêt lors des dernières années grâce à l'émergence de nouvelles techniques expérimentales (diffraction inélastique des rayons X par exemple, jouvence de l'ILL), à la nécessité d'une meilleure compréhension de propriétés telles que la conductivité thermiques dans certains matériaux par exemple (thermoélectriques, amorphes) et à la possibilité d'effectuer des simulations sur des systèmes dont la taille permet d'aborder des systèmes réalistes. Cette thématique est particulièrement développée pour les systèmes simples sous pression, les systèmes « complexes » (fullerènes, thermoélectriques, amorphes, ondes de densité de charge, quasi cristaux...) et les supraconducteurs où le couplage électron-phonon joue un rôle majeur. La possibilité d'effectuer des calculs et simulations de plus en plus réalistes permet maintenant de mener de front expérimentation et simulations. Un des verrous à lever dans ce domaine restera pour les années qui viennent réside dans l'interprétation théorique des simulations et expériences.

## Transformations de la matière condensée – Cristallographie résolue en temps

Suivre les transformations de la matière, *in situ*, en temps réel, a toujours été un objectif essentiel mais souvent hors de portée. Les problématiques associées sont très variées : diffusion dans les solides, réactions chimiques à l'état solide, transitions de phase, nucléation et croissance de cristaux, etc.

Encore exceptionnelles, des mesures de diffraction complètes, avec une résolution temporelle de 100 ps sont maintenant

obtenues, en particulier à l'ESRF, permettant de suivre des structures métastables photo-induites. Cette nouvelle activité qui relève maintenant pleinement de la section 05 sera aussi développée sur SOLEIL et devrait connaître un grand développement dans les années à venir. De grands espoirs se focalisent aussi sur le FEL allemand qui devrait permettre de descendre à des temps de l'ordre de la femto seconde et de suivre la dynamique de transition électronique.

De façon plus générale, le suivi en continu d'un diagramme de diffraction pendant une réaction fait souvent apparaître des phases intermédiaires et la compréhension détaillée des mécanismes de formation des matériaux serait précieuse pour optimiser leurs propriétés. Une des questions de fond posées par ces observations ultra-rapides est de savoir si un chemin de réaction peut toujours être déduit de données certes résolues en temps avec la précision nécessaire mais ne procurant à chaque instant qu'une vision globale moyennée des systèmes.

## 1.2 NANOPHYSIQUE

Le développement des nanotechnologies repose sur la maîtrise structurale de nano objets, de l'échelle atomique jusqu'à leur assemblage en dispositifs, typiquement à des échelles supérieures au micromètre. Il faut savoir faire croître des nano-objets (approche du bas vers le haut « bottom-up ») ou nano structurer (approche du haut vers le bas) réguliers qu'il est d'usage de classer suivant le nombre de dimensions nanométriques qu'ils possèdent, points, lignes, couches ultra-minces.

### Nanostructures

Les recherches menées sur les nano-objets aussi bien au niveau de leur croissance par des techniques variées que de leurs propriétés structurales et physiques continuent de croître de manière spectaculaire. La nano-

physique autour de ces objets prend toute son ampleur à cause de nouveaux effets qui apparaissent, qui n'existent pas dans les matériaux massifs équivalents, dès qu'au moins une de leurs dimensions devient du même ordre de grandeur qu'une caractéristique physique du matériau : libre parcours moyen des électrons, rayon de Bohr de l'exciton dans les semi-conducteurs, longueur de corrélation magnétique...

Les domaines concernés sont très variés allant de l'optique au magnétisme en passant par la catalyse et les propriétés mécaniques des solides, et les nano-objets étudiés vont des nanoparticules auto-organisées ou non, déposés sur des surfaces cristallines ou non ou bien enrobés dans des matrices, des nanotubes ou nano-fils jusqu'aux interfaces et hétérostructures rencontrées dans les matériaux nanostructurés : composites, couches minces et multi-couches de semi-conducteurs, de métaux, d'oxydes ou hybrides, bi-cristaux...

### **Nanoparticules bi-métalliques**

On assiste depuis quelques années, aussi bien au niveau national qu'international, à un fort développement dans le domaine des nanoparticules bi-métalliques. Le fait d'associer deux métaux au sein d'une particule de taille nanométrique, d'où le terme de nanoalliages, permet d'étendre considérablement les potentialités de ces systèmes grâce à une diversité structurale couplée aux effets d'ordre chimique et de ségrégation superficielle. Par comparaison avec les alliages métalliques en volume, le rapport élevé du nombre d'atomes de surface par rapport à celui de cœur conduit à une grande diversité de structures atomiques et chimiques faisant apparaître des phases nouvelles par rapport au diagramme de phase volumique, ce qui élargit encore davantage le spectre des applications potentielles : magnétisme, optique, catalyse... Ainsi l'étude de diagrammes de phases de nanoalliages, où la taille du système apparaît comme une troisième variable, représente actuellement un enjeu crucial dans le domaine des nano-

sciences où il est nécessaire de rassembler les compétences expérimentales et théoriques au niveau national.

Les recherches menées sur ce thème visent à comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la croissance des nanoparticules bi-métalliques, d'étudier leurs propriétés structurales, physiques (magnétiques) et chimiques (catalytiques) en fonction de leur taille, de leur structure et de leur composition chimique. Pour cela, des développements importants sont nécessaires au niveau de l'élaboration des nanoparticules dans le but d'obtenir des nano-objets dont on contrôle la taille, la structure et la composition chimique. D'un point de vue encore plus fondamental, les modifications des comportements thermodynamiques de ces systèmes de dimension réduite par comparaison avec les comportements observés dans les matériaux massifs (effet de taille sur les diagrammes de phases) sont au cœur de cette thématique.

En France, il existe une large communauté de physiciens et de chimistes autour de la thématique des nanoparticules bi-métalliques, qui est très active tant au niveau des modes d'élaboration et des techniques de caractérisation que dans l'étude de leurs propriétés optiques, magnétiques et catalytiques. Plusieurs équipes de recherche sont aussi spécialisées dans la modélisation de leurs propriétés structurales, physiques et chimiques. Ainsi, un GDR a été créé en 2008 sur cette thématique.

### **Nanostructures carbonées : des nanotubes de carbone au graphène**

Les dernières décades ont vu naître et s'épanouir les recherches sur les fullerènes (découverts en 1985), puis celles sur les nanotubes de carbone (mis en évidence en 1991) et enfin sur le graphène (depuis 2004), sans oublier les nano-diamants : les nanostructures carbonées, aux extraordinaires propriétés électroniques, optiques, mécaniques, etc, sont l'objet de nombreuses études fondamentales ou à visée industrielle. Il n'est pas possible de

détailler ici la liste exhaustive des recherches menées autour de ces nano-objets par les chercheurs de la section 05. Citons simplement deux domaines d'études importants autour de :

- la structure et l'organisation des nano-carbones. Les échantillons sont multi-phasés et leur étude structurale est donc délicate. Les chercheurs doivent, pour parvenir à des conclusions sans ambiguïté, associer expériences et modélisation et croiser un ensemble de méthodes complémentaires, multi-échelles : microscopie électronique à haute résolution, microscopie tunnel, diffraction électronique, spectroscopie EELS, microscopie électronique à balayage, photoluminescence, spectroscopie Raman, diffusion des rayons X et des neutrons. Ces études, complexes, sont la pierre de base des études des propriétés physiques, chimiques ou des effets biologiques de ces nano-objets.

- la croissance des nanotubes de carbone. Après 19 ans de recherches intensives menées partout dans le monde, les mécanismes de croissance des nanotubes de carbone sont encore mal compris et la croissance d'une seule sorte de nanotube, de diamètre et d'hélicité fixés, est toujours un rêve. Depuis quelques années, des analyses *in-situ*, pendant la croissance, sont développées (dans un microscope électronique, sur un spectromètre Raman ou sur synchrotron) qui devraient conduire à des avancées importantes dans les années à venir...

Enfin, le graphène (un plan de graphite) a pu être isolé en 2004 et on sait aussi maintenant à le faire croître. Les électrons dans ce nouveau système peuvent être décrits comme ayant une masse nulle et nombre de propriétés originales en découlent. Ces dernières années ont vu le développement de exponentiel des études théoriques et expérimentales dans le domaine.

Les premières réalisations expérimentales de ce système ont non seulement révélé les très bonnes propriétés de transport de ce nouveau matériau, mais aussi des effets quantiques reliés à la structure électronique particulière de ce dernier, comme par exemple un effet Hall quantique anormal. Aujourd'hui différentes techniques (graphène exfolié, crois-

sance sur SiC) permettent d'obtenir du graphène de bonne qualité. Les études des propriétés de ces films et de leur utilisation comme support à la croissance de nanoplots, qui intéressent la section 5, commencent donc à se développer.

## Des surfaces aux nanostructures

À côté des méthodes usuelles de nanostructuration par lithographie post-dépôt, les approches dites bottom-up combinent les maîtrises des techniques de croissance et des effets de contraintes. La fonctionnalisation des substrats permet, de plus, d'accéder à des auto-organisations régulières. Parmi les plus récents développements, on peut noter l'élaboration de nanofils semi-conducteurs par la voie vapeur-liquide-solide.

## Surfaces dans le milieu ambiant

L'espace 2D est exploré depuis des décennies par la physique des surfaces et interfaces qui est un objet d'études fondamentales par les propriétés spécifiques qu'il induit la rupture de périodicité par rapport aux matériaux volumiques : réarrangements atomiques (relaxations, reconstructions) ou chimiques (ségrégations superficielles, réactivité), transitions de phase (pré-fusion, désordre ou ordre induit par la surface, mouillage). De nombreuses questions fondamentales restent posées, que ce soit sur des systèmes *a priori* simples (dynamique de surface, marches) ou plus complexes (surfaces de quasi-cristaux, alliages de surfaces, surfaces d'oxydes, interfaces entre matériaux de nature différente).

## Environnement

L'étude des surfaces et nanostructures n'est plus confinée aux systèmes sous vide et ultra-vide. Le développement des techniques expérimentales permet des études sous gaz, en condition de fonctionnement (*in ope-*

*rando*), en milieu liquide. Ces études se font principalement par le développement de micro-cellules de réactivité, de méthodes de pompage différentiel, et de techniques pouvant opérer sous gaz ou en milieu liquide, comme les méthodes de caractérisation optique (rayons X, UV-visible, IR).

### **Propriétés et techniques expérimentales spécifiques des surfaces**

Les observations à l'échelle nanométrique des surfaces ont depuis longtemps dépassé le cadre de la mesure de la topographie. Les propriétés électroniques et magnétiques sont couramment observées. Les développements portent sur les mesures à l'échelle nanométrique des propriétés thermiques et élastiques des surfaces, sur l'amélioration de la résolution des propriétés chimiques et structurales, sur l'augmentation de la sensibilité pour des mesures de forces, et sur des études de propriétés spécifiques, comme par exemple des modes de plasmons de surface. Parmi les nouvelles techniques apparues récemment et développées en France, on peut citer le Grazing Incidence Fast Atom Diffraction, qui est en quelque sorte l'équivalent du RHEED avec des atomes ; le Ballistic Electron Emission Microscopy qui permet entre autres d'observer le magnétisme de couches minces à l'échelle du nm.

### **Auto-organisation**

Traditionnellement, l'élaboration de nanostructures passe par des dépôts de films minces et leur structuration latérale par lithographie. Ces techniques continuent de progresser mais approchent de leurs limites. De nombreux travaux sont en cours pour trouver des méthodes d'élaboration alternatives fondées sur l'auto-organisation « naturelle » (par exemple, à partir des reconstructions) ou « artificielle » (par exemple, par pré-adsorption). Le cas des reconstructions de surface est particulièrement illustratif de ce passage de l'étude d'un phénomène (carac-

térisation et compréhension de la reconstruction) à son utilisation (nano structuration par la contrainte). Ainsi, la reconstruction en chevrons de Au (111) permet d'utiliser cette surface comme gabarit (modulable par des marches) pour auto-organiser des agrégats magnétiques (Co, etc.). Dans la continuité des études de l'auto-organisation de nanostructures, une nouvelle étape apparaît : la nano structuration des propriétés. Il ne s'agit pas seulement de comprendre et d'étudier l'origine de l'auto-organisation des systèmes, mais de contrôler les propriétés qui découlent de l'auto-organisation. Citons les effets de couplage dipolaire de nano plots magnétiques, l'influence des corrélations spatiales des boîtes quantiques dans les modes dits « de galerie » de nano disques à base de semiconducteurs, les modifications des propriétés élastiques et plastiques induites par la mise en ordre d'inclusions de tailles nanométriques au sein d'un film mince. Cette nouvelle étape a un effet structurant sur la communauté scientifique et incite les chercheurs de différentes disciplines à collaborer.

### **Agrégats structurés**

Une voie prometteuse, bien que lourde à mettre en œuvre, est l'élaboration des matériaux originaux par assemblage d'agrégats. On peut obtenir des couches minces nanostructurées qui gardent une mémoire de la structure et des propriétés des agrégats libres, intermédiaires entre celles des amorphes et celles des cristaux. Des matériaux covalents nouveaux ont ainsi été préparés à partir des phases cages existant à l'état gazeux. Un autre défi est la mise en réseau 2D d'agrégats supportés.

### **Phases nouvelles en films minces**

Des travaux innovants sont impulsés par les progrès des microscopies en champ proche et des techniques de diffraction sur les alliages de surface (interface) et les films minces, seuls ou en multicouches. Le jeu entre thermodynamique et cinétique et la variété des effets de

support permettent d'obtenir nombre de structures et/ou de compositions qui n'existent pas dans les phases volumiques. Un renouveau des problématiques vient aussi de ce que les matériaux étudiés changent. À côté des interfaces entre métaux, semi-conducteurs et oxydes, un domaine en pleine évolution est celui de l'interaction entre surfaces et molécules organiques ou systèmes biologiques.

### 1.3 SCIENCES DES MATÉRIAUX

Ce domaine que l'on regroupait jadis sous le terme métallurgie, présente à la base une forte interdisciplinarité avec l'INC (chimie) et l'INSIS (mécanique).

L'étude des matériaux « réels » demeure un véritable défi. On passe de l'étude de systèmes modèles à des systèmes réels où plusieurs échelles entrent en jeu : atomique, défauts, taille du grain, etc. Les études *in-situ* et *in-operando* offrent la possibilité d'étudier de manière fine l'influence de cette structuration multi-échelle sur les propriétés physiques pour un matériau en cours d'usage.

Des progrès notables ont été obtenus dans le domaine de la plasticité grâce aux simulations numériques

- à l'échelle atomique, où des simulations en dynamique moléculaire apportent un point de vue très nouveau sur des phénomènes comme l'épinglage des dislocations par des défauts d'irradiation ou encore le durcissement de solutions solides. Les structures de cœur des dislocations sont également beaucoup mieux connues, ainsi que des mécanismes élémentaires comme le glissement dévié, d'une importance considérable pour l'organisation des dislocations en arrangements tridimensionnels responsables de l'érouissage. Des études récentes concernent les processus de nucléation des dislocations à partir de défauts de surface ;

- à l'échelle mésoscopique, où l'on sait maintenant suivre les arrangements qui dépendent de la géométrie de glissement et des inter-

actions élastiques à grande distance. Des prédictions du durcissement latent (modification de la contrainte d'écoulement due à l'interaction avec d'autres systèmes de glissement) deviennent possibles.

Il reste à améliorer la prise en compte simultanée de défauts de dimensionnalités différentes (défauts ponctuels/dislocations ; dislocations/interfaces) et à coupler les simulations mésoscopiques à l'échelle supérieure (éléments finis).

Au plan expérimental, des observations *in situ* par microscopie électronique en transmission (MET) ont montré comment les dislocations se déplacent sous contraintes dans les quasicristaux et des matériaux à microstructures complexes. La méthode des phases géométriques a été utilisée en MET pour mesurer les champs de contrainte de précipités nanométriques ce qui a permis de relier les propriétés mécaniques à la microstructure réelle du matériau. À noter aussi les études très fines de lignes de glissement, rendues possibles par le couplage d'un microscope à force atomique sur une machine de traction. La plasticité des films ultra-minces et des matériaux nanostructurés est un domaine actif qui a bénéficié de l'apport de techniques de diffraction de rayons X *in situ* et de simulation en dynamique moléculaire. La nanoindentation est maintenant très utilisée : elle permet de sonder les propriétés mécaniques aux échelles nanométriques et aussi dans des zones exemptes de défauts. C'est ainsi une technique de choix pour étudier la nucléation des dislocations.

Dans les matériaux qu'ils soient nanostructurés ou massifs, des progrès restent à faire pour comprendre les mécanismes de nucléation des défauts étendus : l'enjeu va de la compréhension des mécanismes de déformation des nanomatériaux à celui de la transition fragile ductile des matériaux massifs. On peut également qualifier de nanomatériaux certains matériaux massifs. Il peut ainsi s'agir d'un système polyphasé, organisé à une échelle proche du nanomètre par transformation d'une phase mère. Se pose alors le problème des transformations de phase mises en jeu pour engendrer cette nanostructure.

L'élaboration de nano-composites à très haute résistance mécanique par déformation plastique intense (tréfilage, torsion-compression, etc.) est un cas particulier qui offre de séduisantes perspectives, par exemple pour la fabrication de conducteurs pour la production de champs magnétiques pulsés. Ces alliages forcés («driven alloys») posent de nombreux problèmes relatifs à leur stabilité thermodynamique et aux transformations de phases imprévues qui peuvent se produire dans le champ de contrainte interne. Ils présentent de plus des microstructures complexes couvrant différentes échelles qui leur confèrent leurs propriétés remarquables.

La compréhension des propriétés mécaniques des matériaux aux petites échelles reste un enjeu scientifique fondamental majeur. Le problème a été posé dès les années 1950 mais le formidable développement des techniques de fabrication et d'analyse des nano-objets offre aujourd'hui des perspectives nouvelles pour aborder ces problèmes. La communauté française s'est structurée en 2008 au sein du GDR Mécano pour répondre de manière efficace aux questions posées par les effets de taille. De nombreux résultats remarquables ont été obtenus et permettent ainsi de placer la France à une bonne place dans la compétition internationale.

## 2 – MATIÈRE CONDENSÉE DITE MAL ORGANISÉE

La section 05 a depuis plusieurs mandatures ouvert ses thématiques vers la matière dite moins organisée vers laquelle sont allés des chercheurs et des unités issues de la matière condensée. Il faut, pour sonder cette matière, la soumettre à des sollicitations diverses, en mesurer les effets, en dégager des interprétations. Ceci exige une instrumentation toujours plus performante et une modélisation accrue qui toutes deux conduisent à des développements aux interfaces. Les matériaux désordon-

nés (verres, granulaires), la matière dite « molle » (gels, systèmes colloïdaux, cristaux liquides) et les systèmes biologiques, présentent des diagrammes de phase, des dynamiques, des propriétés mécaniques et de transport très complexes qui intéressent la communauté de la section 05; ils font l'objet d'une activité théorique importante visant à unifier la compréhension de systèmes aux échelles très différentes (par exemple rhéologie des verres colloïdaux et plasticité des verres métalliques). Cela a conduit ainsi à développer des concepts souvent nouveaux de physique statistique hors-équilibre à l'interface entre plusieurs domaines. Ce sont des domaines très présents aux interfaces avec la chimie, la mécanique, la biologie, et la géologie. En particulier, avec ces deux derniers domaines, les interactions sont de plus en plus fortes mélangeant les communautés de chercheurs ce qui n'est pas sans poser des problèmes d'affectation et d'évaluation. Avant de revenir plus longuement sur l'interface physique-biologie, nous mentionnons plusieurs exemples de domaines où nous retrouvons la section 05 dans ses interfaces :

Les milieux granulaires, prépondérants dans les milieux naturels, ont des potentialités importantes au niveau des applications industrielles et de gestion des risques (écoulements, avalanches, érosion). Les développements récents se portent notamment vers l'étude de la morpho-dynamique des systèmes d'intérêt géologique et du transport sédimentaire.

Les questions d'élasticité, de plasticité et de fracture des milieux hétérogènes font l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques, avec désormais une approche multi-échelles visant à faire le lien entre échelles microscopiques et comportement macroscopique. Cela a conduit depuis quelques années à des développements importants vers la rhéologie des fluides complexes (fluides à seuil, thixotropes, systèmes pâteux, mousses, émulsions...), motivés notamment par les analogies mises en avant depuis une dizaine d'années avec les questions fondamentales de transition vitreuse, «jamming» et brisure d'ergodicité. Ces questions revêtent cependant une importance très concrète dans de multiples

applications du côté industriel et il y a un besoin fort pour développer une compréhension unifiée du comportement mécanique de ces systèmes.

La microfluidique, qui a connu un essor considérable au cours des dernières années, est un domaine par essence trans-disciplinaire. La microfluidique s'est imposée à la fois comme un outil indispensable dans de multiples domaines aux interfaces (physico-chimie, mécanique des fluides complexes, physique des systèmes biologiques, bio-ingénierie...); mais également comme un domaine à part entière au cœur d'études fondamentales mettant en jeu de nouveaux phénomènes physiques. La microfluidique s'étend désormais vers les échelles encore plus petites avec le développement fortement croissant de la nano-fluidique. Ce développement, intimement lié à la maîtrise toujours plus importante des outils de nano-fabrication, ouvre de multiples perspectives vers l'exploration de nouveaux phénomènes et fonctionnalités (nano-filtration, conversion d'énergie, transport de molécules biologiques...).

Les hautes pressions, utilisées pour mieux comprendre les interactions qui fixent la cohésion des solides, intéressent de façon évidente les physiciens de la section 05 mais aussi la physique du globe.

Dans le domaine des nanosciences, le développement de nouveaux objets et techniques nanométriques apporte des outils innovants pour la biologie et la médecine (manipulation de nano objet unique, microscopie en champ proche, nano détecteurs de bio molécules, nanoparticules magnétiques pour l'IRM...). Ces utilisations récentes ouvrent de nombreuses perspectives notamment pour le milieu médical.

## Interface avec la biologie

L'interface physique biologie s'est fortement développée en France depuis 20 ans. La physique y a joué un rôle moteur car de nombreux physiciens issus de la communauté des

propriétés structurales et dynamiques de la matière condensée et de la matière molle sont allés vers cette interface. Ils y apportent leurs connaissances des structures complexes et des assemblages multi-échelles, leurs outils conceptuels (mécanique, physique non linéaires, physique statistique hors-équilibre), et leur savoir-faire en matière d'instrumentation innovante et d'imagerie. Cette interface se retrouve en section à tous les niveaux d'organisation du vivant.

L'étude et la manipulation de molécules individuelles ont rendu possible l'observation en temps réel du fonctionnement biologique (enzymes, moteurs moléculaires). Les techniques d'imagerie (« champ proche », nanoparticules, marqueurs fluorescents) permettent le suivi individuel d'une molécule au cours de son cheminement dans la cellule ou sur la membrane, la visualisation d'un réseau en action dans la cellule ou encore la visualisation des interactions enzyme-ADN.

De nouvelles méthodes d'imagerie optique, acoustique ou Imagerie par Résonance Magnétique – IRM (microscopie non-linéaire, optique à haute résolution, imagerie à ondes évanescentes, tomographie cohérente et incohérente...) offrent de nouvelles perspectives, tant en biologie que pour des applications médicales. Le développement de nouvelles approches comme la diffusion X résolue en temps est également en plein essor pour l'étude de la structure ou de la réactivité de molécules biologiques.

À un niveau de complexité supérieur, la biologie cellulaire bénéficie de multiples approches relevant de la physique et de la chimie, qui permettent d'appréhender des processus complexes comme la fusion membranaire, l'adhésion, la migration, la polarité et la différenciation cellulaire.

La reconstitution et l'auto assemblage de systèmes biomimétiques, domaine où s'exprime largement notre communauté, ouvre aujourd'hui de nombreuses voies d'application. Les systèmes multicellulaires, dont la dynamique de fonctionnement met en jeu de nombreux réseaux de signalisation et de régu-

lation, peuvent aujourd'hui être abordés par une approche physique (populations neuronales, développement embryonnaire, morphogénèse et régénération des tissus).

La mécanique et l'hydrodynamique physiques, associées à l'utilisation de structures micro fabriquées (motifs, réseaux, canaux micro fluidiques) permettent de modéliser le comportement mécano sensible des cellules, ou la croissance des tissus, en fonction de paramètres extérieurs (rigidité, écoulements, gradients de nutriments...), avec des retombées importantes dans le domaine de l'oncologie ou de l'environnement..).

De même, la compréhension des mécanismes élémentaires de la perception (visuelle, acoustique ou tactile) est un domaine où les outils et les modèles de la physique permettent actuellement des avancées spectaculaires.

La biologie des systèmes concerne une faible partie de la communauté de l'interface physique-biologie de la section 05 mais y est tout de même présente. Les réseaux biologiques (réseaux génétiques, ou de protéines) sont omniprésents dans la matière vivante et orchestrent le fonctionnement de la cellule, ses cycles et son horloge mais aussi ses réponses à des stimulations ou à des changements d'environnement. À une autre échelle, les réseaux d'interactions entre individus dans les colonies d'animaux génèrent des phénomènes d'auto-organisation et des comportements collectifs. L'enjeu qui émerge, en particulier pour la physique statistique et numérique, porte sur ces systèmes ayant une multiplicité de niveaux d'organisation biologique, et dont le comportement global dépend, souvent de façon non-linéaire, de l'architecture de ces réseaux. La physique apporte à ces études des méthodes d'investigation, notamment optiques, de plus en plus résolues spatialement et temporellement, mais aussi des concepts permettant de modéliser ces phénomènes dans leur globalité.

## 3 – LES OUTILS DE LA RECHERCHE

### 3.1 TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET INSTRUMENTATION

En physique de la matière condensée, les expériences jouent un rôle essentiel. Si certaines sont encore légères et demandent plus d'imagination et d'habileté que de moyens financiers, beaucoup d'autres sont très sophistiquées et coûteuses. Parmi celles-ci, un grand nombre exige une infrastructure de Très Grands Equipements (TGE). Dans tous les cas, des personnels ingénieurs et techniciens qualifiés sont indispensables pour les mener à bien. Le secteur de la physique est globalement sous doté en personnel ITA ce qui est dommageable non seulement à notre discipline mais aux autres sciences aussi, étant donné le rôle prépondérant joué par les physiciens en matière d'instrumentation scientifique. Un renforcement des effectifs d'ingénieurs et techniciens est nécessaire dans de nombreux secteurs innovants.

La physique expérimentale de la matière condensée fait appel, principalement à trois grandes classes de méthodes ou de moyens d'étude : les moyens d'élaboration, les méthodes spectroscopiques (incluant la diffraction) et enfin les microscopies et autres techniques d'imagerie et de microanalyse. On constate que ces différentes classes de dispositifs doivent de plus en plus souvent être réunies sur un même appareillage pour donner des résultats probants. C'est une tendance lourde due en particulier à la part grandissante prise par l'étude des objets de dimension nanométriques dont la réactivité chimique impose une caractérisation complète *in situ*. Ceci se traduit alors soit par l'adaptation en laboratoire des moyens de caractérisation sur les bâtis d'élaboration, soit dans le cas des TGE par la réalisation de bâtis adaptables.

Par exemple, il est indéniable que les microscopies en champ proche ont révolu-

tionné la science des surfaces et qu'il est à présent impensable d'aborder ce domaine sans disposer d'un STM ou d'un AFM. Se discute à présent la possibilité d'associer imagerie chimique et structurale (XAFS) à l'échelle nanométrique par combinaison de micro-faisceaux X et de sondes locales (AFM ou SNOM). Pour étudier des interfaces enterrées et des systèmes multicouches, il est essentiel d'utiliser aussi d'autres techniques, par exemple la diffusion de rayons X en incidence rasante aux petits et aux grands angles (GISAXS et GIWAXS). Plus généralement, pour avoir une approche multi-échelle du volume jusqu'au niveau atomique, il faut coupler des techniques de diffraction des neutrons, des rayons X ou des électrons avec l'imagerie par microscopie électronique.

La création de centrales technologiques et plateformes expérimentales (ex IEMN de Lille, EMIR ou MET-SA), alimentant et d'une certaine manière infléchissant le travail des laboratoires, n'est pas contradictoire avec le développement par les laboratoires de nouveaux instruments conçus spécifiquement pour des expériences moins lourdes. Les chercheurs doivent être encouragés à préserver leur capacité à réaliser des montages originaux et à ne pas s'en remettre entièrement à des appareils achetés « clé en main ». Pour cela, il est indispensable de veiller à ce que le financement des plateformes et réseaux ne se fasse pas au détriment des moyens expérimentaux des laboratoires et à maintenir des services (bureau d'étude, ateliers de mécanique, électronique, programmation, etc.). Plus généralement, il faut rappeler que les découvertes les plus remarquables sont souvent dues à l'apparition d'un nouvel instrument.

Il y a en France une Ecole d'instrumentation qui s'est illustrée au travers du développement de la radiocristallographie, de la microscopie électronique à balayage, de la sonde ionique, de la sonde atomique tomographique, des détecteurs de particules et des TGE. L'instrumentation est un élément important de l'interdisciplinarité que le CNRS entend développer. Il faut revitaliser l'instrumentation scientifique française par un meilleur soutien et

une meilleure reconnaissance accordés à ceux qui se consacrent à cette activité à haut risque, avec de longues périodes non productives en termes de publications. Ceci passe entre autre par une revalorisation de la part du soutien de base des laboratoires par rapport au financement sur projets à court terme, de type ANR.

Très succinctement, on peut souligner quelques évolutions en cours ou quelques projets pour chacune des grandes catégories d'instruments.

### **TGE, sources de neutrons, rayonnement synchrotron**

Ces Très Grands Equipements sont indispensables à un grand nombre de travaux sur la matière condensée.

Le Laboratoire Léon Brillouin et l'Institut Laue Langevin restent des fournisseurs très efficaces de neutrons. L'ILL a vu se concrétiser son programme de jouvence qui a abouti à des gains significatifs sur le flux et la détection, permettant d'étudier des échantillons plus petits par exemple. Le LLB est aussi un fournisseur de neutrons important, complémentaire de l'ILL. Il assure par ailleurs un rôle important et indispensable de formation des utilisateurs. Le développement continu des instruments autorise de plus en plus des études de la matière biologique jusqu'ici impossibles faute de quantité de matière suffisante. Les études en conditions extrêmes ont récemment bénéficié de la mise au point de « presses gros volumes ». On notera aussi celles s'appuyant sur des caractéristiques particulières des neutrons comme la variation de contraste isotopique ou à la diffusion inélastique.

Le projet d'une « European Spallation Source » (ESS) est maintenant en passe d'être budgétisé. Le projet sera développé à Lund (Suède) avec une mise en service à l'horizon 2020. Les premières équipes pour la conception sont mises en place. Il est important de maintenir une communauté Française active autour de cette technique.

2007 a été l'année des premiers photons fournis par le nouvel anneau français de lumière de 3<sup>e</sup> génération, SOLEIL, construit en Ile-de-France. Après quelques retards, les premières lignes de lumières ont été ouvertes aux utilisateurs experts fin 2008. Au final, la communauté disposera de 24 lignes inscrites au budget initial. Le choix des lignes de lumière assure le caractère pluridisciplinaire de ce centre de recherche et garantit une interaction fructueuse entre les diverses communautés de chercheurs. Parmi les avantages de Soleil, citons :

- la résolution spectrale et la forte brillance pour la détection de traces encore plus faibles et l'étude à très haute résolution des excitations électroniques et vibrationnelles de la matière ;
- la polarisation (linéaire et circulaire) de la lumière pour l'étude du magnétisme, de nanostructures en particulier ;
- la focalisation pour les systèmes de petite taille ou confinés en conditions extrêmes ;
- la cohérence pour la dynamique des systèmes désordonnés, les fluctuations, etc.

L'imagerie y sera développée dans toute la gamme des longueurs d'onde, depuis l'infrarouge jusqu'aux X durs. La bio-cristallographie y tiendra une large place, tout en s'insérant dans un programme plus large d'étude de la matière biologique, en solution, aux interfaces etc. Une part significative d'activités liées à des enjeux de société comme l'environnement ou la recherche médicale, ou à des objectifs industriels est attendue.

Les synchrotrons de 3<sup>e</sup> génération ont permis le développement de nouvelles techniques d'analyse structurale : la diffraction X résonnante allie la sélectivité chimique et la sensibilité à l'ordre de l'EXAFS à la sélectivité de phase de la diffraction. La diffraction magnétique résonnante des rayons X donne accès à des modifications structurales qui sont indétectables sur les pics de diffraction non magnétiques. La diffusion aux petits angles sous incidence rasante renseigne sur la morphologie et l'organisation spatiale, à une échelle mésoscopique, entre des objets présents sur une surface (auto-organisation de

plots) ou enterrés dans une matrice hôte (films minces nanocomposites).

Quoique le plus souvent non locales ou à faible grandissement, les techniques X progressent vers une réelle imagerie microscopique : micro-tomographie 3D avec une résolution spatiale approchant le micron, cartographie d'orientations cristallines ou de niveaux de contrainte, radiographie en contraste de phase ou avec un contraste renforcé par des effets de diffraction entre le monochromateur et un second cristal analyseur placé derrière l'échantillon, méthode bien adaptée à l'observation des objets peu absorbants (matière biologique, etc.). À citer aussi, la microscopie de photo-émission (PEEM) avec des rayons X polarisés circulairement qui donne une image locale de l'aimantation, avec une sélectivité chimique qui permet d'analyser couche par couche une hétéro-structure.

La mise en service des lasers à électrons libre dans le domaine des rayons X durs (énergies de 8 à 20 keV), est une véritable révolution. En effet, le faisceau produit aura une cohérence transverse de l'ordre du mm et une brillance 10 ordres de grandeur supérieure à ce qui est obtenu dans les synchrotrons de troisième génération. De plus la structure temporelle sera également plusieurs ordres de grandeur inférieure à ce qui est disponible actuellement avec des impulsions de durée de l'ordre de 10 à 100 fs. Pour résumer la potentialité de ces faisceaux, il suffit de retenir qu'il y aura autant de photon dans une impulsion de 10 fs que pendant 1 sec sur une source synchrotron de troisième génération telle que l'ESRF, permettant donc de réaliser des expériences sur une seule impulsion.

Parmi les domaines d'application dans le champ de la section 05 on peut citer : l'imagerie par diffraction de molécule unique (biologie en particulier), mesures de phénomènes ultrarapides entre 10 fs et quelques ps (couplage électron-phonon, réaction photo-induites et transfert électroniques, état intermédiaires...), mesure de forme et champ de contraintes de nano-objets enterrés, dynamique « lentes » (transitions ordre-désordre, phénomènes diffusifs, phasons dans les cristaux aperiodiques...) de

la microseconde à la seconde, visualisation de propagation d'ondes de choc, propagations de phonon.

Il y a actuellement trois projets dans le monde qui visent à produire des faisceaux Laser X dans le domaine de longueur d'onde autour de 0,1 nm en utilisant des sources « électrons libres » : Stanford (USA), Spring 8 (Japan) et Hambourg (X-FEL Européen). Stanford a produit le premier faisceau laser X dur en 2009 et les premières expériences démarrent en 2010, Spring 8 devrait démarrer en 2011 et Hambourg en 2014.

Il est incompréhensible que l'investissement financier de la France dans le laser Européen X-FEL de Hambourg reste aussi ridiculement faible qu'actuellement.

Enfin, il est à noter le programme ambitieux concernant l'Upgrade ERSF pour intégrer les nano faisceaux mais aussi l'effort particulier fait en France dans le domaine de la nano imagerie 3D basses énergies et ses applications à la biologie, la matière diluée et les systèmes colloïdaux. La reconstruction de l'objet étudié passe par un traitement d'image qui nécessite le développement d'algorithmes puissants tournant sur des clusters dans lesquels il est impératif de mettre de la physique.

## Accélérateurs, irradiations

L'irradiation est une sollicitation particulière des matériaux dont l'intensité peut être ajustée sur une large gamme en jouant sur les caractéristiques des projectiles utilisés. L'intérêt des irradiations est double : comprendre et prévoir les comportements des matériaux qui les subissent d'une part, et de l'autre, utiliser les irradiations pour modifier les matériaux et créer de nouvelles propriétés.

Sur le premier plan, les environnements radiatifs pour lesquels une activité sur les matériaux sous irradiation reste nécessaire sont liés aux problèmes de sécurité des installations nucléaires, de gestion des déchets radioactifs ou au domaine de l'espace où les effets du rayonnement cosmique sont activement

étudiés pour les dommages qu'il pourrait occasionner.

La description des matériaux organiques sous irradiation fait intervenir une étape supplémentaire de chimie radicalaire, décrite en détail pour l'eau mais beaucoup moins bien dans les phases solides où des techniques de spectroscopies résolues en temps restent à mettre en œuvre. Le comportement de la matière biologique sous irradiation est décrit par une succession d'étapes (physiques, chimiques, biologiques) plus ou moins indépendantes. Même si cette approche se justifie par la séparation temporelle de ces étapes, une approche interdisciplinaire serait certainement profitable, notamment avec l'utilisation conjointe par les trois communautés des irradiations pulsées.

D'une façon générale, les irradiations en laboratoire fournissent une base de connaissances indispensable à la réalisation de simulations numériques seules à même de prévoir les conséquences des irradiations dans les conditions réelles (champ complexe, diverses contraintes couplées, temps d'exposition longs, etc.). Elles fournissent aussi un moyen efficace de modifications contrôlées des couches de surfaces des matériaux. Dans ce domaine, l'implantation ionique en immersion plasma (PIII ou PBII), encore peu développée en France est une technique efficace pour le traitement d'échantillons de géométrie complexe ou le dopage des jonctions ultra minces.

Rappelons toutes les informations données par les faisceaux d'ions en matière d'analyse : ordre structural, composition, gradient de concentration, etc. Les mêmes accélérateurs possédant le plus souvent les deux fonctions d'irradiation et d'analyse. Ces analyses peuvent être menées sur des matériaux mais aussi au niveau de cellules ou tissus biologiques, elles sont par essence d'usage pluridisciplinaire. Il y a certainement une action à mener pour augmenter les collaborations entre la communauté des irradiations et les physiciens de la matière condensée.

## Microscopie électronique et Nanosciences

L'essor des nanosciences s'est accompagné du développement et/ou de l'amélioration de techniques de caractérisation permettant d'aller plus loin dans la connaissance ultime des nano-objets. Des techniques d'études spécifiques ont vu le jour : citons par exemple la microscopie en champ proche magnétique, la microscopie de photoélectron couplée au rayonnement synchrotron (PEEM)...

Parallèlement à ces développements, le microscope électronique est devenu un instrument incontournable lorsqu'on étudie des nano-objets et tous les laboratoires dont les thématiques sont centrées sur les nanosciences possèdent un ou plusieurs microscopes. Aujourd'hui la microscopie électronique n'est plus un simple outil dédié à l'imagerie mais permet de déterminer et de comprendre les propriétés structurales, chimiques et électroniques de nano-objets et de nano-structures grâce à la diversité et à la complémentarité de différentes techniques présentes sur un seul instrument : imagerie et diffraction filtrées en énergie, spectroscopie de pertes d'énergie des électrons et analyse X dispersive en énergie avec une sonde nanométrique, tomographie, microscopie de Lorentz, holographie... Elle permet de plus d'étudier une très large gamme de matériaux allant des nano-objets aux objets de taille micrométrique en passant par les bio-matériaux. Dans tous les cas, l'analyse structurale des objets étudiés et la compréhension des relations entre la structure et leurs propriétés locales ou macroscopiques demandent des informations sur la nature chimique et les états électroniques des éléments étudiés ainsi que l'arrangement structural de ces éléments. Dans de nombreux cas, ces informations doivent être déterminées à l'échelle de quelques nanomètres.

Depuis quelques années, la microscopie électronique quantitative connaît une véritable révolution technologique tant au niveau des sources d'électrons avec le développement de monochromateurs qu'au niveau des lentilles électromagnétiques avec le développement

des correcteurs d'aberration sphérique. Ainsi, il est non seulement possible de résoudre des structures en imagerie directe grâce à une résolution ponctuelle inférieure à 0,1 nm mais également de quantifier, dans le cas des objets de phase, l'intensité de l'image haute résolution puisque dans ce cas l'intensité d'un point est directement reliée au potentiel projeté du cristal dans le plan d'observation. L'intérêt d'une telle avancée technique ne se limite pas à la résolution ponctuelle en imagerie. En effet, les microscopes équipés de tel correcteur permettent également de s'affranchir des effets de délocalisation, extrêmement limitatifs pour l'étude structurale des interfaces et des joints de grains. L'absence de délocalisation permet d'envisager l'étude de surfaces de nano-objets en projection.

Dans le cas de la spectroscopie de perte d'énergie à haute résolution associée à la microscopie, les progrès proviennent surtout de l'apparition de nouvelles sources, monochromateur ou canon à cathode froide, et également de l'amélioration des spectromètres. Les performances actuelles tendent à rapprocher la spectroscopie EELS de la spectroscopie d'absorption X (XAS). La résolution spatiale de l'EELS combinée à une résolution en énergie attendue sur les nouveaux MET (0,1 eV), comparable à celle du XAS, laisse envisager un champ d'application considérable. La résolution spatiale (inférieure à 0,1 nm) est désormais accessible à la spectroscopie EELS grâce à la correction d'aberration de sphéricité du condenseur permettant la focalisation du faisceau d'électrons dans une sonde de 0,05 nm (ultime). Il devient désormais possible d'obtenir des informations spectroscopiques (valence, état de liaison) d'un atome, d'une impureté, d'un défaut ou bien encore relatives à une interface.

En lien avec la réduction de la taille des objets étudiés, de nouvelles difficultés surgissent au niveau de la manipulation, de l'orientation des objets (qui peuvent être très anisotropes et nécessiter plusieurs directions d'observation) et au niveau de la visualisation, de la détection et de l'analyse des signaux de très faibles intensités issus de ces objets aux

dimensions réduites. Si on veut surmonter ces difficultés, il faut avoir accès à des méthodes adaptées pour la préparation des échantillons (Focused Ions Beam – FIB), bénéficier de microscopes dédiés ayant chacun les meilleurs performances possibles dans un domaine d'application donné (résolution spatiale, résolution en énergie, limitation du bruit de fond...) et développer des méthodologies, combinant expériences et modélisations, en ayant toujours comme objectif de déterminer des informations quantitatives sur les objets étudiés. Pour parvenir à ce but, un réseau national, METSA, assure pour la communauté scientifique française la plus large ouverture d'instruments de pointe ainsi que la mise à disposition des compétences de chercheurs spécialisés dans les toutes dernières techniques de microscopie électronique avancée et de sonde atomique à la communauté scientifique française.

## Microscopies en champ proche

L'apport considérable des microscopies en champ proche pour les nanosciences a déjà été largement évoqué. Ces techniques sont idéales pour obtenir des informations libres de tout effet de moyenne, permettant à la fois d'atteindre les propriétés intrinsèques des nano-particules et de mieux comprendre les effets de couplage avec leur environnement. Suivant la nature du matériau, et de sa topographie, les propriétés physiques locales sont analysées par microscopie tunnel (STM), puis une étude spectroscopique, souvent à basse température, permet d'examiner les propriétés électroniques traduisant le confinement quantique ou diélectrique de ces nanostructures. Pour le cas des matériaux magnétiques, aucune sonde locale du magnétisme n'existe à l'heure actuelle en solution de routine, mais il est certain que la microscopie tunnel utilisant des sources d'électrons polarisés en spin va se développer dans un avenir proche.

Il faut souligner aussi l'emploi des microscopes à champ proche pour l'élaboration de nano-objets, construits atome par atome ou molécule par molécule ou encore pour la fabrication et la manipulation de petits agrégats. Les

microscopes en champ proche permettent également d'organiser artificiellement ces nanostructures sur un substrat non fonctionnalisé, tout comme ils peuvent être utilisés outils de gravure, de marquage ou de greffage, contribuant ainsi à la fonctionnalisation des substrats.

Les développements actuels de techniques comme le STM ou l'AFM concernent surtout les observations sous différents environnements. À titre d'exemple, le couplage d'un microscope à force atomique à une micro-machine de traction ou encore l'observation des empreintes de nano-indentations ont ouvert un nouveau champ d'investigations sur les mécanismes de formation des défauts à la surface des solides contraints.

## Diffusion inélastique et quasi élastique de la lumière

La spectroscopie Raman à basse fréquence renouvelle l'étude du vieillissement des matériaux polymères ou vitreux, en mettant en évidence des fluctuations de cohésion à l'échelle du nanomètre résultant de séquences de déplacements atomiques coopératifs.

L'interférométrie Raman, mettant à profit la grande longueur de cohérence spatiale des phonons acoustiques, permet de sonder un grand nombre de diffuseurs et d'en déterminer, grâce aux effets d'interférence, la répartition spatiale. On peut ainsi mettre en évidence la localisation spatiale d'états électroniques 2D par le désordre. On peut également mesurer le degré d'alignement de boîtes quantiques superposées, alignement – en principe – induit par les contraintes d'épitaxie.

## Spectroscopie de molécules uniques

Parmi les défis à relever, citons l'observation de molécules adsorbantes non fluorescentes. La microscopie de contraste interférentiel photo thermique pourrait l'autoriser. Elle est d'ores et déjà capable de détecter des particules d'or de quelques nm qui

peuvent être couplées par voie chimique à des molécules organiques.

Autre défi, effectuer des observations « à température ambiante », ce qui est essentiel pour les systèmes biologiques (actuellement cryofixés en général). Une piste est l'application de cycles thermiques locaux, rapides, pour reconstituer la dynamique de protéines, par exemple, au moyen d'une série d'instantanés, pris à basse température, de la même molécule.

### **Sources lasers pulsées et expériences « pompe-sonde »**

L'apparition de sources lasers pulsées et accordables donne lieu à un développement important des études de dynamique de la matière condensée, les durées d'impulsions, qui descendent jusqu'à quelques dizaines de femtosecondes, étant bien adaptées aux temps caractéristiques de nombreux phénomènes. Dans les expériences « pompe-sonde », une première impulsion, de puissance relativement forte, excite l'échantillon puis une seconde, dérivée de la première retardée, vient mesurer l'état de l'échantillon à un temps donné par le retard imposé. Les cristaux à effet non linéaire permettent de disposer de longueurs d'ondes différentes pour les deux impulsions.

Au niveau microscopique, la relaxation vers l'état d'équilibre de l'excitation induite par l'absorption de photon se fait par une cascade de processus qui dépendent, de façon cruciale, de la structure électronique du matériau considéré (métal, semiconducteur, isolant), ainsi que de sa taille et de son environnement. Au final, l'échantillon aura vu sa température monter, de quelques dizaines à quelques centaines de degrés. Il peut en résulter la disparition d'une phase ordonnée (par exemple, le ferromagnétisme), ce qui signifie que la dynamique de cet ordre est accessible par de telles expériences.

Le paramètre-clé de ces études est l'accordabilité en longueur d'onde, qui permet de créer une excitation spécifique, puis de

sonder sélectivement l'état de l'échantillon, ce qui est indispensable pour séparer les différents processus de la cascade de relaxation de l'énergie.

Le développement de sources laser à impulsions courtes (fs) et d'énergie importante (J) permet de créer à la surface de l'échantillon un champ électrique extrêmement important. Entre autres types de particules, des rayons X sont émis en impulsions d'une centaine de femtosecondes. Ceci donne accès à une science X ultra-rapide d'un grand intérêt pour les études de dynamique structurale.

Un gain de plusieurs ordres de grandeurs tant en augmentation de la brillance qu'en diminution de la durée des pulses est attendu des futurs lasers à électrons libres. Une autre voie, beaucoup moins lourde, et également prometteuse pour approcher le domaine de la femtoseconde, est celle des tubes X utilisant les sources lasers pulsées accordables mentionnées ci-dessus, même si le plus faible flux en restreint l'application aux phénomènes reproductibles périodiquement.

### **Élaboration de films minces et autres matrices de nano-objets**

Les outils d'élaboration des films minces et ultra-minces, souvent à la base des nanostructures, ont bien évolué. L'épitaxie par jets moléculaires permet par exemple une gradation très précise des compositions qui permet de mieux contrôler les niveaux de contrainte dans les hétérostructures, et d'améliorer la qualité cristalline, même si les dislocations restent encore un réel problème dans nombre de systèmes.

Les techniques utilisant les faisceaux d'ions, au même titre que la chimie douce, font aujourd'hui partie de la panoplie alternative d'élaboration de matériaux nano structurés en films minces ou en îlots disséminés en surface ou à proximité.

## Simulation numérique et théorie en matière condensée

Les activités théoriques en Matière Condensée sont souvent regroupées sous le sobriquet modeste de « modélisation » qui se veut mêler « théorie » et « simulation numérique », illustrant leur attachement à décrire (comprendre, représenter...) une réalité concrète par l'étude de systèmes réalistes en ce qu'ils sont proches des observations expérimentales, voire de conditions et des propriétés d'usage (applications). Il ne s'agit pas d'opposer activités théoriques et numériques, mais de rappeler que ces dernières sont une partie intégrante et un élément indispensable du triangle « expérience-simulation-théorie », tout en étant clairement différentes dans leur forme et dans leur esprit d'une pure activité théorique ; « expérimentation numérique » est souvent un terme approprié. Ces différents domaines ne doivent cependant pas se concevoir comme des activités séparées, mais comme un continuum ; de nombreux physiciens ont des activités mixtes impliquant au moins deux de ces trois aspects. La modélisation et l'expérimentation numérique peuvent être vues comme un moyen d'interaction directe avec l'expérience réelle, comme un laboratoire d'idées pour l'expérience comme pour la théorie. C'est un champ naturellement interdisciplinaire par le partage des outils communs avec les mathématiques appliquées, l'ingénierie, la chimie...

La modélisation en Matière Condensée se doit de rendre compte des diverses échelles mises en jeu : spatiales (du nm au m) ou de temps (de la picoseconde à l'heure... voire plus). Ces diverses échelles interviennent simultanément par exemple du point de vue des diverses longueurs caractéristiques d'un phénomène d'auto-organisation, ou des divers temps caractéristiques de processus cinétiques de croissance et/ou de diffusion. Actuellement on peut distinguer (i) la modélisation explicite de la structure électronique (ii) les approches de physique statistique et chimie physique et (iii) les approches en direction des grandes échelles en lien avec les sciences pour l'ingénieur. Un défi actuel est de faire interagir ces différentes échelles, au sein des groupes de

recherche comme au sein des programmes de calcul. Dans ce contexte la méthodologie moderne consiste à partir d'une description à l'échelle atomique des interactions (structure électronique), permettant ensuite d'identifier les mécanismes élémentaires mis en jeu (par dynamique moléculaire ou méthodes de Monte-Carlo d'équilibre) à des échelles inférieures au nanomètre et à la nanoseconde, puis d'en déduire des mécanismes effectifs (par exemple ceux de la diffusion) permettant de passer à des échelles supérieures (en distance et en temps) par l'utilisation de simulations de type Monte-Carlo cinétique par exemple. Dans les cas les plus appliqués, les événements identifiés et leur énergétique peuvent même venir nourrir les logiciels de simulations généralement basées sur une approche de type « milieux continus » et qui reposent sur des modèles comportementaux. Deux exemples ce type de démarche est peut-être celui de la TCAD (Technology Computer Aided Design) en micro-électronique, ou la dynamique des dislocations (DD) dans le domaine de la plasticité des métaux.

Pour ce qui est de l'étape fondamentale que constituent la détermination de la structure électronique et le calcul de l'énergie d'un système de particules en interaction, l'arsenal des méthodes disponibles est vaste depuis les méthodes dites *ab initio* (i.e. ne faisant appel à aucune paramétrisation ; ce qui ne veut pas dire sans approximation !) jusqu'aux approches plus légères mais paramétrées regroupées sous le vocable « potentiels semi-empiriques » (liaisons fortes, potentiels effectifs...). En ce qui concerne les premières, la situation en France a évolué très favorablement ces dernières années. En effet, l'utilisation de ces approches pour aborder des problèmes relevant du domaine de la matière condensée a connu un formidable essor, y compris en matière d'avancées méthodologiques, de développement d'algorithmes et de logiciels (i.e. la spectroscopie d'états excités). Dans ce cadre, le GDR DFT a joué un rôle essentiel, tant dans le développement des méthodes que dans la structuration de la communauté concernée... voire de toute la communauté des théoriciens et des numériciens, au-delà de la DFT. Mal-

heureusement, la lourdeur des méthodes issues de la DFT en restreint pour l'instant l'utilisation à des systèmes « simples », aux échelles (temps, espace) les plus basses, même si des avancées sont en cours vers l'étude d'une matière plus complexe : nanotubes, verres... (Couplage entre dynamiques moléculaires quantique et classique, méthodes QM-MM issues de la Chimie Quantique).

Dans l'optique de simulations numériques appliquées à des matériaux réalistes, plus ou moins loin de l'équilibre, dans des conditions (température, pression...) variées, il n'est pas envisageable de compter sur ces seules méthodes *ab initio*. L'alternative est plutôt de les utiliser pour fonder les meilleurs potentiels (semi-empiriques) possibles, réalistes et adaptés aux types d'interaction mises en jeu (métaux, isolants, semiconducteurs, systèmes moléculaires...). De ce point de vue, l'école française autour des « liaisons fortes » propose une alternative particulièrement bien adaptée pour fonder l'énergétique d'une liaison chimique pour une simulation numérique moderne en permettant de moduler le niveau de description de la structure électronique nécessaire au bon traitement du problème abordé, et ce tant pour les métaux et alliages que pour les covalents à base de carbone (nanotube, graphène, matrices poreuses d'électrodes...) ou de silicium. Dans le même ordre d'idée, la physique statistique des liquides et des colloïdes (en volume ou confinés) et plus globalement toute la physique-chimie ont grandement bénéficié de simulations basées sur des potentiels effectifs décrivant les interactions interatomiques, intermoléculaires ou inter-colloïdales avec des approches en théorie des perturbations. Dans cette optique un protocole incontournable en modélisation des matériaux semble être le suivant : structure électronique (ab initio et/ou liaisons fortes) → potentiels semi-empiriques → mécanismes élémentaires et mécanique statistique (Dynamique Moléculaire/Monte-Carlo à l'équilibre) → mécanismes effectifs → processus à grande échelle (Monte-Carlo cinétique). Qu'il s'agisse du développement des méthodes non *ab-initio* ou des approches couplées (Dynamique Moléculaire ↔ Monte Carlo), la communauté fran-

çaise est bien armée, héritage d'une longue tradition culturelle en physique et chimie des solides et des liquides. Notons dans la dernière étape du protocole des avancées spectaculaires liées au développement des méthodes dites *meso-scale* comme les approches de type « Lattice Boltzmann » ou de « champ de phase » avec l'existence un GDR dédié. L'aspect « multi-échelle » est aujourd'hui le grand défi en science des matériaux, matière condensée et nanosciences. Pourtant, on ne trouve pas autour de l'ensemble de ces méthodes de structure fédératrice. Il existe certes des Journées annuelles de la Simulation Numériques (JSNum) qui permettent aux numériciens de se rencontrer de façon informelle, mais ce sont les ateliers (ou les écoles) du CECAM qui ont le plus souvent joué ce rôle de lieu institutionnel de rencontre pour la communauté de la simulation. À noter que le CECAM a maintenant quitté Lyon pour Lausanne, et que les « maisons de la simulation » seront un moyen d'assumer ce rôle d'animation scientifique.

## Structuration de l'activité

Vaut-il mieux rassembler des théoriciens ou les saupoudrer dans des groupes expérimentaux ? Il n'existe bien sûr pas une réponse universelle, et des situations particulières peuvent générer des besoins (et donc des solutions) différents. Ceci dit, si l'on réfléchit en terme de politique globale, l'idée que les théoriciens doivent être regroupés devient toute à fait défendable, dans des ensembles de dimension bien sûr variables, depuis le petit groupe de modélisation d'un laboratoire à vocation essentiellement expérimentale, jusqu'au département d'un laboratoire de taille plus importante. L'enjeu essentiel est ici la visibilité internationale de ces groupes, en tant que spécialistes de la modélisation. Le risque de la dilution des théoriciens dans des groupes d'expérimentateurs est que l'activité théorie soit vécue (et développée) comme une prestation de service, forcément sclérosante à terme. Même auprès des grands instruments qui génèrent des données expérimentales dont l'interprétation nécessite absolument l'utilisa-

tion voire le développement d'outils de simulation numériques sophistiqués, il est apparu qu'il y avait plus à gagner à regrouper les théoriciens/numériciens dans des structures dédiées plutôt qu'à les rapprocher des dits-instruments, comme l'illustre la création de l'ETSF (European Theoretical Spectroscopy Facility) autour du développement de la théorie et de codes de calcul pour la détermination les excitations électroniques des matériaux et la prédiction de leurs propriétés spectroscopiques (en lien avec des expériences telles que la photo-émission, les pertes d'énergie d'électrons, la diffusion inélastique des rayons X ou encore l'optique linéaire et non-linéaire...). Le grand avantage de regrouper des théoriciens n'est pas seulement de leur permettre de prendre du recul par rapport au quotidien des expériences, mais aussi de les rendre plus forts par l'association de cultures, de compétences et d'outils différents, et plus efficaces par la mise en place de moyens de calculs dédiés performants. Ainsi, s'il est clair que l'activité de modélisation en matière condensée a vocation à nourrir (et à se nourrir de) la réalité expérimentale, elle doit pouvoir s'en éloigner... même si c'est pour mieux y revenir. En ce sens, la création de « départements de théorie et modélisation » dans les grands laboratoires paraît être le compromis le plus efficace pour favoriser la synergie entre théorie et expérience, tout en accordant à la première la possibilité de développer une recherche propre (développements méthodologiques en particulier).

À côté de ces départements et à condition d'assurer une cohérence thématique, on peut envisager de créer en France une structure qui permette de regrouper des numériciens de façon non pérenne en favorisant des échanges culturels plus larges sur des temps modulables et qui permettrait à des chercheurs français et étrangers de se rencontrer et d'interagir sur des temps limités, comme à l'ICTP (International Center for Theoretical Physics) de Trieste ou les différents Collaborative Computational Projects britanniques (<http://www.ccp.ac.uk/>) qui sont thématiquement très cohérents et qui ont des actions de formation très en pointe. Ceci

afin de promouvoir la culture numérique chez une majorité de physiciens et la reconnaissance des aspects méthodologiques dans le domaine numérique en incitant au développement pérenne de logiciels de simulation (notamment pour des applications massivement parallèles, notamment hybrides (calcul parallèle/calcul sur carte graphique (GPU) qui ouvrent de grandes perspectives pour la modélisation multi-échelle et les calculs *ab initio*).

Les sujets de recherche porteurs d'avenir sont nombreux et peuvent être listés de manière non-exhaustive comme suit :

**Modélisation « multi-échelle »** (pour la plasticité, la poro-mécanique... en favorisant les activités qui s'efforcent d'associer plusieurs échelles différentes notamment pour les propriétés mécaniques, thermiques ou électriques, interface avec les sciences pour l'ingénieur)

**Phénomènes coopératifs** (transitions de phases, phénomènes de mouillage, propriétés dynamiques à travers les transitions de phase, phénomènes critiques dans les systèmes désordonnés, dynamiques lentes, transition vitreuse, transition de piégeage/dé-piégeage)

**Transport** (propagation des ondes, localisation, transport d'électrons, modélisation stochastique de recherche et de poursuite aléatoires intermittentes, transport fluidiques aux nano-échelles, superhydrophobie, micro-nageurs, autopropulsion, élasto-capillarité, interface entre dynamique des fluides, physique statistique et nanosciences.)

**Au-delà de l'ordre cristallin** (incommensurables, quasi-cristaux)

**Matière sous conditions extrêmes** (solides, liquides sous pression et température ou confinés, interface avec la physique du globe, la géologie, la chimie)

**Physique des surfaces** (croissance, auto-organisation, processus de croissance et comportement critique d'une interface en mouvement)

**Agrégats, nanofils et autres « nano-objets »** (effets de taille, depuis la structure

électronique jusqu'aux propriétés mécaniques et thermodynamiques)

**Interaction matière-rayonnement** (matériaux sous irradiation)

**Corrélations fortes** (matériaux magnétiques, électronique de spin et nanomagnétisme, transitions de phase quantiques, supra magnétisme, effet hall quantique, interfaces avec la physique des atomes froids)

**Fluides complexes** (colloïdes, polymères, bio-matériaux, cristaux liquides, interfaces avec la chimie et la biologie)

**Spectroscopies** (excitations électroniques des matériaux, propriétés spectroscopiques, lien avec la photo-chimie et l'optique linéaire et non-linéaire).

Pour finir, on peut souhaiter que la direction de l'INP-CNRS affiche clairement la modélisation numérique parmi ses priorités en soutenant les équipes de recherche qui développent des activités bien identifiées dans ce domaine (postes de chercheurs et d'ITA) et soutienne les initiatives interdisciplinaires vers la Chimie, les Mathématiques, les Sciences pour l'Ingénieur et les Sciences de l'Univers.



# MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

## *Président*

Étienne BUSTARRET

## *Membres*

Fabien ALET

Thierry BRETAGNON

Gregory CHABOUSSANT

Xavier CHAUD

Claudine CHOPIN-NOGUERA

Claude DELALANDE

Didier FELBACQ

Abdeslem FNIDIKI

Yann GALLAIS

Yves HENRY

Annick LOISEAU

Dominique MAILLY

Claude PASQUIER

Frédéric PETROFF

Olena POPOVA

Lucia REINING

Dimitri RODITCHEV

Antoine RONDA

Dietmar WEINMANN

Pierre-Étienne WOLF

## 1 – INTRODUCTION

À première vue, les grands axes thématiques de la section 6 sont identiques à ceux de l'édition 2006 du rapport de conjoncture. Le découpage alors adopté en quatre thèmes principaux, (a) les semi-conducteurs, (b) la physique mésoscopique, (c) le magnétisme et la spintronique, et (d) les systèmes fortement corrélés, reste en effet d'actualité. Mais cette similitude cache une évolution notable. Relativement découplés dans le passé, ces différents thèmes se rejoignent de plus en plus. Ainsi, la spintronique, héritière de cette électronique de spin que la communauté française et en particulier Albert Fert ont contribué à fonder, fait-elle désormais appel tout à la fois aux matériaux semi-conducteurs, à des concepts de physique mésoscopique, et aux oxydes développés dans le cadre des systèmes corrélés. En physique mésoscopique, de plus en plus d'études impliquent des systèmes où les corrélations électroniques ont des conséquences importantes. Enfin, l'application aux systèmes corrélés de certains concepts initialement développés pour les semi-conducteurs a permis la fabrication d'hétérostructures d'oxydes fonctionnels, ouvrant de nouvelles perspectives tant fondamentales qu'appliquées. Ainsi, non seulement les différents axes thématiques partagent outils et systèmes,

mais ils s'intéressent de plus aux mêmes phénomènes ou situations physiques.

Une évolution similaire a lieu entre différentes sections de l'INP. Au-delà des interactions bien établies (avec la section 2 pour la modélisation des systèmes corrélés, la section 5 pour les études structurales, etc.), de nouvelles convergences se développent. Par exemple, l'utilisation de semi-conducteurs pour réaliser des sources de photons uniques ou jumeaux concerne également la section 4. Les nouveaux condensats de polaritons, initialement étudiés en 6, le sont maintenant aussi en section 4 (et 8, à l'INSIS). À l'inverse, les théoriciens de la section 6 (comme ceux de la section 2) appliquent les concepts développés pour les superfluides ou supraconducteurs de la matière condensée aux condensats d'atomes ultrafroids étudiés par les expérimentateurs de la section 4, etc. Les frontières traditionnelles entre ces différents domaines sont également atténuées par des regroupements d'unités dans des contours élargis favorisant l'interaction entre chercheurs issus de différentes sections.

Cette transversalité dépasse le cadre de l'INP. Les relations sont évidemment fortes avec la section 8 au sein d'unités de l'INSIS, mais bien d'autres interactions existent, que ce soit au travers de développements instrumentaux, comme avec l'IN2P3 et l'INSU, ou par le biais de la synthèse des matériaux, comme avec l'INC (sections 13 et 15 en particulier). Ces fortes interactions font la richesse du CNRS. Un enjeu majeur pour le futur est d'en assurer une bonne reconnaissance institutionnelle.

Malgré ces évolutions, une présentation selon les quatre axes évoqués a cependant l'avantage de fournir une grille de lecture, et nous l'avons donc maintenue. Nous y avons ajouté 3 axes transverses :

(i) La théorie et la modélisation, car, si chacun des axes thématiques génère ses propres questionnements théoriques, les méthodes employées pour les aborder, et parfois les concepts sous-jacents, se rejoignent souvent.

(ii) L'instrumentation, que ce soit à l'échelle des TGIR ou des laboratoires, puisque, de façon symétrique à la modélisa-

tion, elle a un caractère fédérateur pour les expérimentateurs. Mais aussi pour souligner le fait qu'une instrumentation innovante est une des clés des succès futurs.

(iii) Les applications, pour en illustrer toute la diversité à travers quelques exemples d'école.

## 2 – SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs et singulièrement leurs nanostructures sont au cœur de nombreux développements actuels qui vont de la physique fondamentale aux applications. Ceux-ci découlent de la grande souplesse qu'a le physicien dans la définition des propriétés de ces matériaux. Les méthodes modernes d'épitaxie et la nanostructuration permettent d'imaginer de nouvelles possibilités qui dépassent souvent la simple amélioration des méthodes classiques d'alliage et de dopage et sont du ressort de la physique fondamentale : les systèmes électroniques à zéro dimension (la boîte quantique), à une dimension (le fil quantique), à deux dimensions (les puits quantiques) sont fondamentalement différents du matériau massif. Le contrôle et la compréhension du confinement électronique et/ou optique et du couplage exciton/photon qui peut en résulter, ainsi que celui du spin de l'électron, objectifs fondamentaux actuels de ce domaine, rapprochent encore les semi-conducteurs de la physique mésoscopique et du nanomagnétisme. Au-delà de prétextes applicatifs parfois galvaudés, nous verrons qu'un certain nombre de sujets sont également stimulés par les contraintes d'une éventuelle application industrielle en rupture.

### 2.1 ÉLABORATION

Dans le domaine des semi-conducteurs, la fabrication des échantillons (matériaux, méta-

matériaux, nano-objets et dispositifs) est une étape clef de la démarche expérimentale, indissociable de leur caractérisation physique et de leur modélisation. L'obtention des effets physiques recherchés requiert en outre souvent de combiner croissance et nanostructuration.

C'est certainement dans le domaine des matériaux à large bande interdite («grands gaps»: Séléniures, nitrures, oxydes dont ZnO, SiC, Diamant, etc.) qu'il reste le plus d'efforts à fournir, car il est difficile de leur trouver des substrats en accord de maille, ou des dopants des deux types. Le silicium tend à concurrencer le saphir comme substrat pour la croissance de GaN; ZnO et GaN pourraient se servir mutuellement de substrat. La taille et la qualité des substrats de SiC et de diamant progressent nettement. L'adjonction du phosphore au semi-conducteur GaMnAs améliore ses propriétés magnétiques, de même que l'antimoine dans GaAsN. On sait désormais obtenir des boîtes quantiques (parfois alignées) auto-organisées à l'interface de semi-conducteurs à grand gap par effet de contrainte, ouvrant cette physique des boîtes à un domaine spectral différent du proche infrarouge (IR). Afin d'éviter de forts champs piézo-électriques internes, on élabore des structures non polaires selon des directions de croissance moins classiques.

Signalons une retombée de la physique de SiC: par traitement thermique d'une surface de ce composé, on sait obtenir des monocouches de graphène. L'engouement de la physique fondamentale pour ce matériau 2D à gap nul et à relation de dispersion linéaire sera d'autant plus justifié que l'on saura obtenir des échantillons de grande taille, à dopage contrôlable par action d'une grille.

C'est peut être l'obtention de nanofils quantiques semi-conducteurs par des méthodes de croissance «bottom-up» qui constitue le résultat majeur de ces toutes dernières années. Les mécanismes de croissance localisée assistée par catalyseur (VLS: vapeur-solide-liquide) font l'objet d'études approfondies, dans les fils III-V, II-VI et des éléments IV. Comment contrôler le phénomène de nucléation? Pourquoi diverses phases cristallines peuvent-elles coexister dans le même fil?

Comment stabiliser ces structures dans leur environnement? Le succès récent de la structuration tant radiale (structures cœur-coquille) qu'axiale (boîte comme tranche fine d'un fil), la possibilité d'une croissance localisée des fils (à l'aide de la lithographie électronique) et de compatibilité de paramètres de maille très importants sans création de défauts étendus, sont très prometteurs.

Il faut ajouter ici les progrès accomplis par les méthodes de chimie douce. On sait maintenant fabriquer des nanoparticules cœur-coquille où l'épaisseur de la coquille est telle que le semi-conducteur au cœur est protégé des effets néfastes de surface mais pas des effets bénéfiques de confinement. La dispersion de leur taille est de quelques pourcents. La technique s'applique à certains II-VI et bientôt aux III-V avec des applications en biophysique (marqueurs luminescents), en optique quantique (émetteurs de photons uniques) et bientôt dans le domaine photovoltaïque.

## 2.2 CONFINEMENTS

Les méthodes théoriques nécessaires pour décrire les propriétés électroniques des assemblages de semi-conducteurs se trouvent au carrefour des méthodes «top-down» (type fonction enveloppe) et «bottom-up» (type *ab initio* et méthodes sœurs). Le succès immense de la première méthode a été un atout de la communauté française et lui a permis de diffuser dans les laboratoires, même auprès des expérimentateurs: on parle d'ingénierie de bandes. Si l'on élargit aux propriétés optiques, compte tenu de la complexité des empilements ou nanostructures envisagés par exemple pour les cristaux photoniques ou les métamatériaux, la mise au point de programmes de simulation numérique performants du comportement électromagnétique est devenue nécessaire pour guider la réalisation matérielle. Aussi bien là que pour les méthodes *ab initio*, qui commencent d'ailleurs à aborder les propriétés optiques ou les matériaux moléculaires, un travail des spécialistes demeure indispensable.

Les expérimentateurs auront toujours besoin, le plus près possible d'eux, de théoriciens compétents qui s'intéressent, au moins à temps partiel, à leur problème spécifique. Prenons garde d'en former suffisamment dans les années à venir.

Un domaine où la physique fondamentale du confinement électronique et l'ingénierie de bandes ont eu un apport primordial est celui des lasers à cascade. Si ces lasers fonctionnent à température ambiante dans le moyen infrarouge, ils sont encore limités aux basses températures dans le domaine térahertz (THz). C'est maintenant dans le contrôle de l'interaction électron-phonon que réside un espoir. La recherche du même type de structures pour les détecteurs IR et THz, pour l'utilisation de propriétés non linéaires par mélange avec les fréquences optiques, est également dynamique. Ces nouvelles sources, auxquelles il faut ajouter celles résultant de techniques de redressement d'impulsions lumineuses ultracourtes, rendent possibles un grand nombre d'études nouvelles, que ce soit sur la dynamique vibrationnelle de grosses molécules (biologiques par exemple) ou sur la spectroscopie et la dynamique d'états électroniques, par exemple sous champ magnétique.

Un autre domaine d'application de l'ingénierie des bandes est celui de la conversion photovoltaïque à haut rendement, où certains assemblages et concepts développés dans d'autres contextes restent inédits. Enfin, l'utilisation des transitions inter sous-bandes des hétérostructures à base de semi-conducteurs à grand gap, rend possible des émissions et des absorptions aux longueurs d'onde des télécommunications (1,5  $\mu\text{m}$  et 1,3  $\mu\text{m}$ ).

La physique des microcavités planaires (un ou plusieurs puits quantiques insérés dans une cavité optique planaire composée de miroirs de Bragg) est actuellement dominée par la recherche (dans les matériaux mal contrôlés) et l'obtention (dans les III-V et II-VI classiques) du couplage fort exciton-photon donnant naissance aux polaritons de microcavité. La condensation de Bose-Einstein des polaritons, pendant leur durée de vie, maintenant clairement mise en évidence expé-

riementalement, fait également l'objet de développements théoriques. Son observation à plus haute température a été effectuée avec des puits de semi-conducteurs à plus grand gap et des systèmes 1D. On peut prévoir dans ce système modèle une grande activité fondamentale (propriétés de spin, cohérence spatio-temporelle, comportement superfluide des condensats, coalescence, etc.). Notons aussi les recherches concernant des systèmes hybrides tels que nitrures et perovskites, nitrures et oxydes, et en dehors des matériaux traditionnels, dans des nanomolécules telles que les nanotubes de carbone.

Ce même couplage fort est maintenant observé dans les boîtes quantiques insérées dans des microcavités 3D, où le confinement optique est obtenu par la fabrication de cristaux photoniques ou par la présence contrôlée d'une boîte dans un fil servant alors de guide d'ondes. La modification des caractéristiques spatio-temporelles de l'émetteur en régime de couplage faible est et sera l'objet de nombreuses études tant fondamentales qu'applicatives, par exemple en vue de la récupération rapide du maximum de lumière d'une diode électroluminescente dans une direction donnée, etc.

Un peu en marge des activités de la section, la nanophotonique présente des opportunités intéressantes de recherche. Les cristaux photoniques ont suscité des espoirs importants qui n'ont pas forcément été suivis de réalisations. Toutefois, les efforts investis ont permis une excellente maîtrise de la nanofabrication. L'intérêt essentiel des cristaux photoniques se situe dans leur capacité à localiser fortement le champ électromagnétique dans des cavités et à permettre un très fort effet Purcell. Ils sont donc adaptés dans les études concernant l'interaction lumière-matière, en particulier pour la réalisation de laser à bas seuil ou plus généralement la réalisation de gain excitonique.

Dérivés des cristaux photoniques, les métamatériaux sont une nouvelle classe d'objets artificiels possédant des propriétés homogènes, c'est-à-dire une permittivité et une perméabilité effectives, qui peuvent être contrôlées. C'est ainsi que l'on sait fabriquer des structures possédant, dans une gamme de fréquences, une

permittivité et une perméabilité négatives. Plusieurs communautés s'intéressent à ces objets, des micro-ondes à l'optique en passant par les térahertz. Récemment, leurs propriétés non-linéaires ont été étudiées, notamment par l'insertion de milieux actifs. De nombreux domaines méritent d'être explorés dans cette direction, en s'intéressant par exemple aux phénomènes collectifs dans des réseaux de nano-objets actifs (QDs), à l'effet laser aléatoire, etc.

Un dernier domaine en émergence est celui de la plasmonique. Il s'agit d'utiliser les plasmons pour propager le champ électromagnétique. Là encore, beaucoup de domaines peuvent être explorés : applications télécom, biophysique, études fondamentales : oscillations de Rabi entre plasmons et excitons, émission de lumière cohérente, effet Casimir, transfert radiatif.

## 2.3 OPTIQUE QUANTIQUE

La génération de photons uniques ou de paires de photons intriqués par une boîte quantique unique, processus nécessaires à la cryptographie quantique, est démontrée à basse température. Il s'agit maintenant d'obtenir une meilleure collection, un haut débit et, plus difficile, d'arriver à un fonctionnement à température ambiante. Dans ce but, l'utilisation de boîtes insérées dans des fils (absence de couche de mouillage, environnement différent) de semi-conducteurs à plus grand gap (énergie excitonique et séparation spectrale supérieures) est prometteuse. L'émission à partir d'impuretés dans les semi-conducteurs en général et des centres colorés très stables et éventuellement magnétiques du diamant en particulier, ne doit pas non plus être négligée.

En revanche, on a plus de mal à croire que les excitations électroniques correspondantes puissent être le support de plusieurs qubits nécessaires au calcul quantique. Cette recherche farouchement fondamentale ne doit plus prendre le prétexte d'une application plus immédiate au motif qu'il s'agit de semi-conducteurs.

Plus originaux et peut-être plus prometteurs sont la mise en évidence et l'utilisation du couplage ultra-fort dans le domaine des térahertz. Le *splitting* de Rabi peut y être supérieur à l'énergie du photon. On a là un domaine initié plutôt par l'aval mais où la physique fondamentale, au carrefour de l'optique et de l'électronique haute-fréquence, peut apporter de nouveaux concepts.

## 2.4 AUTOUR DU SPIN

Un axe important de la physique actuelle des semi-conducteurs concerne les phénomènes liés au spin, en relation avec l'information quantique et la spintronique.

La spintronique au sens large couvre des phénomènes assez différents : contrôle du spin par la lumière, le champ électrique, le courant électrique, ou, à l'inverse, contrôle par le spin des propriétés lumineuses ou du transport électrique. Dans certains cas, les semi-conducteurs pourraient présenter des avantages, par rapport aux métaux en particulier.

Il en est ainsi pour la manipulation cohérente d'un spin unique (porté par exemple par le manganèse) dans une boîte quantique (par exemple de GaAs ou de CdTe). L'objectif est d'utiliser la variable spin comme support de qubit dans une perspective d'information quantique. L'analogie avec la RMN et la RPE, mais sur un spin unique, est frappante et les études nécessaires de la décohérence de spin sont très actives. L'optique y contribue, avec la résolution temporelle sub-picoseconde qu'elle permet. Dans les meilleurs systèmes, le spin des noyaux environnants est limitant mais, inversement, l'aimantation nucléaire peut servir à orienter le spin électronique. Ces études sophistiquées sont utiles pour la compréhension des mécanismes de transport de spin et aussi dans la recherche de systèmes plus performants en tant que support à cette variable quantique cohérente qu'est le spin.

C'est également le cas pour la réalisation de nouveaux dispositifs intégrés, combinant

spintronique (manipulation du spin) et électronique traditionnelle (manipulation de la charge), comme le transistor à effet de champ à spin. Les semi-conducteurs peuvent amener ici les avantages d'un temps de vie du spin plus long que dans les métaux, et d'effets résonants liés à la quantification des niveaux d'énergie typique des puits ou boîtes quantiques. Dans ce domaine, un verrou technologique reste la maîtrise de l'injection d'un courant polarisé en spin dans un semi-conducteur et celle de la transformation d'une accumulation de spin en signal électrique. Deux voies sont principalement explorées, l'utilisation de matériaux semi-conducteurs ferromagnétiques dilués (type GaMnAs) et l'élaboration d'hétérostructures associant matériaux semi-conducteurs et matériaux magnétiques.

La première voie nécessite de disposer d'un matériau semi-conducteur ferromagnétique dilué à température ambiante, ce qui n'est toujours pas le cas. GaMnAs a une température de Curie de l'ordre de 200 K. Le ferromagnétisme de ZnO pourrait être dû à des phases métalliques incluses dans le milieu. Il faut donc essayer d'augmenter les températures de Curie par ingénierie de bandes, de contrainte, de dopage (comme pour GaMnAs). On a récemment démontré l'existence, dans le composé GeMn et pour des conditions de croissance particulières, d'une phase ferromagnétique jusqu'à 400 K, bien au delà de la température ambiante. Cette phase est liée à la présence de nanocolonnes riches en manganèse au sein de la matrice de germanium. La recherche devrait sans doute continuer à être très active dans ce domaine.

La seconde voie consiste à utiliser des structures hybrides ferromagnétique/semi-conducteur/ferromagnétique. Une des difficultés est alors l'adaptation d'impédance entre source et drain ferromagnétiques, et canal semi-conducteur. Ce domaine fait l'objet d'études très actives portant sur le choix du matériau, l'influence du couplage spin-orbite, la nature de la barrière tunnel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ , etc.), l'utilisation de fils quantiques pour limiter le nombre de canaux de conduction concernés, la détection ou la manipulation optique de l'accumulation de spin, etc.

## 2.5 QUELQUES PERSPECTIVES

Une part importante des études futures concernera les systèmes hybrides : oxydes/semi-conducteurs pour le photovoltaïque, semi-conducteurs/métaux pour la plasmonique, semi-conducteurs/métaux ferromagnétiques pour la spintronique. La nanostructuration en termes de fils quantiques d'excellente qualité est également très prometteuse. On pourra y combiner propriétés optiques, de transport, et spintronique, y compris dans leurs aspects dynamiques.

Il faut également signaler l'essor considérable des semi-conducteurs organiques, dont l'assemblage et le dopage posent des questions fondamentales quant à la définition des schémas de bandes aux interfaces, mais dont diverses propriétés semblent déjà prometteuses du point de vue des applications à bas coût.

Dans tous les cas, la connaissance fine des matériaux, de toutes leurs propriétés en dehors de toute spécialisation, est nécessaire. Le physicien fondamental saura, on l'espère, trouver de nouveaux concepts et de nouvelles solutions dont se serviront ensuite les applications.

## 3 – PHYSIQUE MÉSCOPIQUE

La physique mésoscopique, à l'interface entre les mondes quantique et classique, décrit des situations dans lesquelles le temps ou la longueur de cohérence de phase des électrons sont comparables ou supérieures aux échelles de temps ou longueurs caractéristiques du système. Dans ce régime intermédiaire, la cohérence quantique peut apparaître dans des systèmes comportant suffisamment de particules pour que les concepts de température ou de moyenne statistique gardent leur sens.

Le régime mésoscopique est réalisé pour des systèmes de taille et/ou dimensionnalité réduite si la cohérence de la quantité observée est suffisante, ce qui nécessite souvent que la température et le couplage à d'autres degrés de liberté soient faibles. La combinaison de la physique quantique avec la physique statistique peut alors mener à l'émergence de nouveaux phénomènes qui peuvent dépendre de différents paramètres comme la géométrie de l'échantillon, le désordre, les interactions entre porteurs de charges, et le couplage à d'autres degrés de liberté comme des phonons ou des photons. Ces phénomènes sont d'un intérêt fondamental certain et peuvent en plus présenter un potentiel applicatif important.

Une grande partie de la physique mésoscopique concerne les propriétés électroniques de nanostructures et de systèmes de dimensionnalité réduite : gaz bidimensionnels d'électrons, éventuellement nanostructurés pour créer des formes géométriques ou des topologies particulières telles des boîtes quantiques ou des réseaux artificiels, structures hybrides constituées de composants métalliques, ferromagnétiques, supraconducteurs, de nanotubes de carbone, ou de fragments de graphène, de molécules uniques ou en petit nombre, etc.

La physique mésoscopique recouvre en partie les domaines de l'électronique moléculaire, de l'électronique de spin, des systèmes pour l'informatique quantique, et également des fermions corrélés, dans la mesure où les interactions entre porteurs sont un paramètre important dans le régime mésoscopique. Certaines situations réalisées avec des gaz atomiques froids dans des pièges optiques relèvent également de cette physique.

### 3.1 ÉLABORATION

Les objets de la physique mésoscopique peuvent être obtenus par deux grandes voies. L'approche top-down, basée sur les techniques de nanofabrication, est par exemple utilisée

pour nanostructurer les gaz bidimensionnels d'électrons, pour fabriquer des structures hybrides combinant métal, supraconducteur, et/ou ferromagnétique. L'approche bottom-up utilise les techniques de la chimie moléculaire ou des phénomènes d'auto-organisation ou d'auto-assemblage. Ces deux approches peuvent être combinées, en particulier lorsqu'il s'agit de contacter des nano-objets (nanotubes de carbone, nanoaimants) pour des mesures de transport quantique.

### 3.2 DÉCOHÉRENCE ET IRRÉVERSIBILITÉ

Un axe de recherches important consiste à étudier sur des objets mésoscopiques la transition entre le monde quantique et classique, à travers la décohérence en présence d'un couplage au monde extérieur, et les limites quantiques du processus de mesure.

Un volet important de cette thématique est l'information quantique avec des réalisations de bits quantiques (qubits) dans l'état solide et leur manipulation pour le traitement quantique de l'information. Ici, on observe une évolution vers des systèmes qui réalisent de plus en plus la physique quantique de base. Simultanément, des efforts importants sont engagés pour manipuler de façon contrôlée et éventuellement résolue en temps les charges et les spins de petits systèmes (voir par exemple le paragraphe sur la nanospintronique).

Un élément important dans ce contexte réside dans les phénomènes évanescents aux surfaces des substrats, qui influent sur la dynamique et la décohérence des dispositifs quantiques sur lesquels ils sont déposés. Des méthodes de champ proche commencent à être utilisées pour sonder ces phénomènes, qui mériteraient d'être étudiés plus en détail.

Le sujet des nano-systèmes électro-mécaniques commence à se développer en France. Ces systèmes combinent degrés de liberté mécaniques et électroniques, et un but impor-

tant est d'atteindre le régime quantique pour la composante mécanique. Cela est d'un intérêt fondamental certain et l'effort national mériterait d'être amplifié.

### 3.3 TRANSPORT QUANTIQUE

La description du transport quantique fait naturellement intervenir les concepts de la physique mésoscopique, puisque le système cohérent à travers lequel on réalise une expérience de transport quantique est inévitablement connecté à des sources de courant et des appareils de mesure macroscopiques, donc classiques.

Une partie de l'effort dans ce domaine concerne les aspects fondamentaux avec la coexistence de concepts classiques et quantiques et l'effet des corrélations électroniques sur le transport. Cela inclut l'étude théorique de systèmes de basse dimensionnalité en interaction forte utilisant le concept de liquide de Luttinger et les études de l'effet Hall quantique fractionnaire, mais aussi les phases topologiques et en particulier les isolants topologiques, une thématique émergente déjà présente en France.

D'autres exemples sont les effets plus traditionnels de blocage de Coulomb ou l'effet Kondo. De nombreuses études s'intéressent non seulement à la conductance, mais aussi au bruit, une quantité qui peut présenter des caractéristiques qui dépendent de la statistique des porteurs de charge et des corrélations.

On peut également signaler le développement de nouvelles approches utilisant des sondes locales. Un exemple en est la microscopie à balayage de grille qui mesure la conductance d'un échantillon en fonction de la position d'une pointe créant une perturbation locale.

Les systèmes au travers desquels le transport est étudié sont souvent nanoscopiques. Cette échelle de taille peut être sélectionnée par la géométrie intrinsèque (fils quantiques,

boîtes quantiques dans des structures métalliques et semi-conductrices, nanotubes de carbone, molécules uniques) ou par la technique de mesure, comme dans le cas de petits ensembles de molécules, sondées au sein d'une monocouche autoassemblée en approchant perpendiculairement à cette couche une nano-électrode ou une pointe AFM conductrice. On peut ainsi étudier l'influence sur les propriétés de transport des interactions inter-moléculaires ou de la nature désordonnée des assemblages moléculaires.

L'électronique moléculaire évolue dans la direction du transport cohérent de spin (à travers molécules, fullerènes, nanotubes de carbone, graphène) et de la manipulation de nano-aimants individuels. L'étude de l'influence des degrés de liberté vibrationnels des molécules sur le transport rejoint la problématique des nano-systèmes électro-mécaniques. Une autre évolution concerne l'étude de molécules fonctionnelles, *i.e.* portant une fonction de traitement de l'information (mémoires moléculaires, commutateurs utilisant les changements de configuration des molécules...). Tandis qu'on observe une certaine activité théorique pour décrire le transport à travers une ou des molécules par des approches numériques et phénoménologiques, le plus grand défi expérimental de ce domaine reste, malgré des progrès indéniables ces dernières années, de créer des contacts bien définis et contrôlés entre molécules et électrodes.

L'étude du transport cohérent dépendant du spin à travers des structures magnétiques présente un intérêt particulier pour le domaine de l'électronique de spin, en particulier les effets de l'aimantation sur le courant et les effets réciproques.

Les systèmes hybrides comportant des éléments métalliques, supraconducteurs et/ou ferromagnétiques, continuent également à être très étudiés, avec le but d'observer individuellement et en compétition les effets de spin et des corrélations supraconductrices.

L'activité reliée au transport électronique dans les systèmes désordonnés, avec les effets

de localisation faible et forte connaît deux développements importants, l'étude de réseaux artificiels avec des effets géométriques et topologiques et l'analogie avec les gaz d'atomes froids.

### 3.4 HAUTES FRÉQUENCES

À très haute fréquence, quand l'énergie d'un photon devient comparable ou supérieure à d'autres échelles caractéristiques d'énergie comme par exemple l'énergie thermique, de nouveaux effets peuvent apparaître. Le régime de fréquences de l'ordre du GHz est ainsi très intéressant, que ce soit sur le plan fondamental, en tant que sonde de la dynamique du système étudié, ou appliqué.

Il sera important de faire le lien entre les domaines du transport à basse énergie et celui de l'optique, qui convergent vers des systèmes et des problématiques voisins. L'extension de la physique mésoscopique haute fréquence au régime THz, où se manifeste la dualité quasi-particule-plasmon des électrons, est un pas dans cette direction.

## 4 – MAGNÉTISME ET SPINTRONIQUE

Dans le domaine du magnétisme, la section étudie aussi bien l'origine microscopique de l'aimantation (magnétisme quantique, magnétisme frustré, etc.) que les phénomènes collectifs liés à cette aimantation (domaines, dynamique, manipulation, effets sur le transport électrique, et). Nous décrivons ici ce second axe, le premier étant traité dans la section consacrée aux systèmes corrélés. De façon générale, le dynamisme de cette thématique résulte d'une synergie entre théoriciens, physiciens expérimentateurs et chimistes motivés par le développement de nouveaux matériaux.

### 4.1 NOUVELLES TENDANCES EN MAGNÉTISME

#### Micro et nanomagnétisme

En micromagnétisme, la plupart des études actuelles concernent l'analyse des arrangements de moments au sein des parois magnétiques ou des configurations de type vortex. Les progrès récents des méthodes expérimentales en termes de résolution spatiale et temporelle (imagerie, transport), comme des méthodes de simulation numérique (codes en éléments finis, prise en compte des effets thermiques, etc.) sont à la base des évolutions dans le domaine. On s'intéresse ainsi à la structure interne de ces objets, à leurs interactions, à leur dynamique ainsi qu'à leur manipulation par différentes méthodes.

À une échelle plus petite, le domaine du nanomagnétisme évolue dans plusieurs directions :

À l'échelle moléculaire, la création de très nombreuses formes de molécules de type agrégats ou molécules-aimants, caractérisées par un cœur organométallique et un milieu de cristallisation, a permis non seulement de tester les concepts physiques tels que l'effet tunnel de l'aimantation mais aussi de laisser entrevoir la production en masse d'objets nanométriques parfaitement contrôlés, tant du point de vue des propriétés que de la structure et de leur fonctionnalisation. Cette approche «bottom-up» est le fruit d'une bonne compréhension des relations magnéto-structurales de ces matériaux. L'effort de synthèse s'oriente vers l'auto-assemblage de structures de taille modeste pour former des structures en agrégats plus importants ou des structures à dimensionnalité réduite.

Un des systèmes majeurs est celui des «molécules-aimants» qui présentent une barrière d'énergie magnéto-cristalline pilotée par une forte anisotropie uniaxiale. Malgré des recherches intenses, le record de la plus grande barrière d'énergie pour un agrégat

moléculaire reste encore de l'ordre de 90K alors que la structure optimale pourrait laisser présager une barrière de l'ordre de 290K.

À une échelle à peine supérieure, un enjeu important pour les applications est d'utiliser des nanoparticules métalliques pour les media d'enregistrement. Pour augmenter la densité, donc réduire la taille, sans compromis sur la stabilité thermique, il faut comprendre et maîtriser les mécanismes de coercitivité dans des amas de quelques nanomètres. Dans ce cadre, les alliages chimiquement ordonnés (CoPt, FePt) à grande énergie d'anisotropie offrent de nouvelles perspectives : la section est impliquée à travers la compréhension de leurs états électroniques, et du rôle qu'ont les contraintes et la taille finie sur leur mise en ordre, leur thermodynamique, et leurs propriétés magnétiques.

Dans le domaine de l'élaboration, une nouvelle tendance est de combiner des approches « top-down » et « bottom-up » (ou auto-organisation guidée). Par exemple, une lithographie classique du substrat permet de structurer des pistes à l'échelle de 100 nm, capables de guider l'auto-assemblage de microdomaines élaborés par auto-organisation. Cet axe est encore peu développé en France.

Il faut enfin mentionner le développement de nanoparticules magnétiques pour les applications, en particulier biologiques (pincettes magnétiques, traceurs, hyperthermie, etc.). La contribution de la section à cette activité très interdisciplinaire et couplée à des industriels est d'étudier le magnétisme de ces particules.

## Ingénierie des interfaces

Les interfaces offrent de nouvelles opportunités pour contrôler le magnétisme et son couplage au transport électronique.

Dans les années 1990, une thématique forte consistait à étudier le moment magnétique aux interfaces et la possibilité d'y induire une anisotropie perpendiculaire. On réalise maintenant que ces interfaces jouent, à travers le couplage au transport, un rôle fondamental

en spintronique. Dans cette perspective, sont actuellement développées des études d'ingénierie des interfaces pour contrôler le transfert de spin via la diffusion ou l'effet Rashba.

## Couplage du magnétisme à de nouveaux degrés de liberté

On s'intéresse ici au contrôle de l'état magnétique par de nouveaux procédés : champ électrique ou électromagnétique, que ce soit dans le domaine hyperfréquence ou optique (en particulier effet Faraday inverse, *i.e.* transfert de moment du photon à l'aimantation, ou photomagnétisme de molécules), déformation, température.

La réalisation de nanoréseaux de matériaux photocommutables est une des voies de ce contrôle, malgré l'effet du couplage entre molécules sur le retournement de l'aimantation.

Il est aussi possible de contrôler l'amplitude de l'aimantation ou sa précession (via un changement de direction d'anisotropie) soit directement à travers le champ électrique (semi-conducteurs, métaux aux interfaces), soit indirectement par le biais des contraintes (appliquées en ancrant le matériau sur un piézoélectrique, ou créant des phonons par une impulsion lumineuse femtoseconde) ou par des impulsions hyperfréquences appropriées. L'avantage du contrôle par changement de direction d'anisotropie est d'induire une précession de l'aimantation conduisant à un retournement quasiment sans coût énergétique, contrairement au cas d'un retournement par un champ magnétique.

On peut ainsi manipuler l'aimantation à l'échelle de la nanoseconde. De telles échelles de temps posent de nouvelles questions fondamentales, comme le rôle de la vitesse du son dans l'établissement de la contrainte. Dans cette situation où plusieurs physiques sont mises en jeu (magnétisme, transport, thermique, etc.), les méthodes de simulation numérique, bien développées en France, ont un rôle important à jouer.

Une tendance récente, limitée pour l'instant au Japon et à l'Allemagne, consiste enfin à

manipuler l'aimantation par des gradients thermiques engendrant (pour une structure de bandes adéquate) un courant pur de spin, permettant de retourner l'aimantation par effet de couple de spin (effet Seebeck magnétique).

## Développements des microscopies magnétiques

La capacité à déterminer l'état magnétique local d'un système est au cœur des progrès expérimentaux en magnétisme. Selon la géométrie et la nature des matériaux (surface ou volume, cristal ou alliage), diverses microscopies magnétiques complémentaires permettent cette détermination à des échelles de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. Bien que parfois anciennes, elles sont en forte évolution. La microscopie de proximité à électrons balistiques (BEEM) offre l'intérêt de coupler imagerie magnétique et transport, avec des applications à la spintronique. La France commence à combler son retard dans le domaine de la microscopie tunnel polarisée en spin. Les microscopies plein champ de Lorentz et holographiques, bien adaptées aux études temps réel avec une résolution de l'ordre de 5 nm, sont, déjà bien développées. La microscopie SPLEEM mériterait de l'être. Les tendances actuelles sont d'utiliser ces diverses microscopies pour étudier l'influence de divers stimuli (transport, illumination, etc.) sur le magnétisme.

## 4.2 SPINTRONIQUE

Les développements récents dans le domaine de la spintronique se caractérisent par des progrès notables dans le domaine des matériaux. Par exemple, les jonctions tunnel magnétiques à base de MgO ont permis de mettre en évidence le rôle de la symétrie cristalline dans la conduction tunnel, et de l'exploiter pour obtenir des magnétorésistances tunnel de plusieurs centaines de pourcents à température ambiante. Ce sont aussi de nouveaux effets

comme le transfert de spin qui découlent des travaux antérieurs sur la magnétorésistance géante, avec un regain d'intérêt pour les hétérostructures à aimantation perpendiculaire qui présentent certains avantages pour les applications. Enfin, de nouveaux thèmes se développent depuis quelques années à l'interface entre la spintronique et les autres grands domaines de la physique de la matière condensée : semi-conducteurs, physique mésoscopique, électronique moléculaire, oxydes, etc. Ceux impliquant les semi-conducteurs et la physique mésoscopique sont traités dans les parties concernées.

### Transfert de spin

Les effets de transfert de spin recouvrent la physique nouvelle des interactions entre un fort courant de spin et l'aimantation d'un corps ferromagnétique. Le couple associé à cette interaction permet de manipuler l'aimantation sans appliquer de champ, uniquement par transfert du moment angulaire de spin depuis un flux de spins porté par le courant électrique. On peut ainsi manipuler des points mémoire (monodomains) ou des parois magnétiques. Dans ce contexte, comprendre l'interaction du courant polarisé avec une paroi fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques. On a pu ainsi observer récemment un décalage Doppler des ondes de spin induit par un courant. Plus généralement, la magnonique (génération, propagation, et interférences d'ondes de spin guidées dans des nanostructures), domaine qui démarre, pose des questions fondamentales sur le couplage magnétisme – réseau en matière condensée.

Un autre axe important est la possibilité d'utiliser le transfert de spin pour la génération d'hyperfréquences. En contrôlant la dépendance angulaire du couple de transfert de spin, on peut obtenir, sans champ magnétique appliqué, une oscillation entretenue de l'aimantation et, par effet magnétorésistif, de la tension aux bornes d'un échantillon dans la gamme du gigahertz. D'autres voies consistent à utiliser un polariseur dont l'aimantation est perpendiculaire au plan des couches, ou des

structures à base de vortex magnétiques. De manière générale, ces nanodispositifs appelés STO (Spin Transfer Oscillator) présentent des caractéristiques intéressantes pour une nouvelle génération d'oscillateurs non linéaires dans une très large gamme de fréquences (500 MHz-40 GHz). Toutefois la puissance émise par un seul oscillateur est pour l'instant trop faible pour les applications visées. Les voies explorées pour y remédier visent d'une part à utiliser des jonctions tunnel magnétiques dont la magnétorésistance est bien plus élevée que les vannes de spin métalliques, et, d'autre part, à synchroniser une assemblée de STO afin de réduire la largeur de raie.

Pour conclure, soulignons que, les effets de transfert de spin étant étudiés dans des objets de basse dimensionnalité (piliers et fils submicroniques), il est fondamental d'associer propriétés de transport, imageries magnétiques et simulations micromagnétiques à l'état de l'art pour progresser dans la compréhension des phénomènes observés.

## Oxydes et spintronique

Un intérêt croissant est porté aux matériaux multiferroïques comme  $\text{BiFeO}_3$ . Un tel matériau, à la fois ferroélectrique et antiferromagnétique avec un couplage entre ces deux ordres, peut être combiné à des couches minces ferromagnétiques pour contrôler électriquement leur aimantation, ouvrant une voie nouvelle à une large gamme d'applications.

Les composés intrinsèquement multiferroïques sont cependant peu nombreux. Pour y pallier, on commence à utiliser l'approche des hétérostructures artificielles d'oxydes, décrite dans la partie consacrée aux systèmes corrélés. En combinant ainsi au sein d'hétérostructures des couches minces ferromagnétiques et ferroélectriques (par exemple  $\text{Fe}/\text{BaTiO}_3$ ), on peut obtenir des matériaux multiferroïques artificiels. Des résultats prometteurs ont été obtenus récemment avec des barrières tunnel ferroélectriques.

## Spintronique moléculaire

Le paragraphe consacré à l'utilisation des semi-conducteurs pour la spintronique a souligné le problème de l'adaptation d'impédance entre matériaux ferromagnétiques et semi-conducteurs. Une solution consiste à utiliser des matériaux ayant une vitesse de Fermi supérieure à celle des semi-conducteurs III-V. Les nanotubes de carbone et le graphène sont à ce titre une alternative excitante avec des résultats prometteurs. La combinaison d'un long temps de vie de spin (lié au faible couplage spin-orbite) à une forte mobilité y rendent possible un transport de spin à longue distance, tandis que leur structure électronique permet la modulation par une grille. Ces propriétés ont motivé de nombreuses propositions théoriques d'utilisation dans des dispositifs : barrière, filtre à spin, transport de spin, etc., avec des réalisations expérimentales en émergence.

Au delà des semi-conducteurs traditionnels, certains semi-conducteurs organiques ( $\text{Alq}_3$ , pentacène...) sont maintenant combinés à des matériaux magnétiques. L'idée plus générale d'utiliser des matériaux moléculaires est d'apporter de nouveaux degrés de liberté liés à l'ingénierie à l'échelle moléculaire et à la multifonctionnalité issue de la combinaison de propriétés électroniques, magnétiques ou mécaniques remarquables. Comme pour les composés carbonés, un avantage majeur de ces matériaux organiques est la faiblesse de leur couplage spin-orbite et de l'interaction hyperfine, de par la faible masse moléculaire des éléments qui les composent. Le temps de vie du spin y est ainsi prédit supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui dans les métaux et semi-conducteurs classiques.

Pour optimiser le transport polarisé en spin dans ces hétérostructures organiques, il sera nécessaire, sur le plan conceptuel, d'élucider la nature du couplage électronique aux interfaces, et sur le plan fonctionnel, de contrôler l'organisation en couches minces sur un substrat. Une solution est l' (auto-) organisation en réseaux grâce aux affinités chimiques, ou même biologiques, des molécules greffées avec leur substrat (or, silice, silicium). Ces tech-

niques sont prometteuses et en plein développement. Un exemple est la réalisation de matériaux multifonctionnels mêlant magnétisme et conduction électrique dans des structures donneur/accepteur composées de couches organiques et organométalliques.

## Nanospintronique

Le rapprochement entre électronique de spin et électronique moléculaire ouvre la voie à une nanospintronique moléculaire visant à manipuler les spins et les charges de dispositifs électroniques. La perspective même lointaine du calcul quantique et l'intérêt potentiel des qubits de spin motivent l'étude du transport dépendant du spin dans des structures 0D. De nombreuses propositions théoriques sont basées sur un nano-objet de quelques nanomètres (agrégat magnétique, nano-aimant moléculaire) connecté à des électrodes ferromagnétiques agissant comme réservoirs de spins. L'intrication du blocage de charge (blocage de Coulomb) et du magnétisme permet par exemple d'envisager le contrôle et la manipulation du spin par la charge et inversement. Les défis à résoudre sont nombreux : élaboration des nano-objets (par exemple par auto-organisation de films moléculaires bidimensionnels), maîtrise des contacts, maîtrise de l'état d'aimantation qui passe par un contrôle des effets d'activation thermique ou quantique, comme du couplage à l'environnement. Les progrès passeront par une forte collaboration entre équipes de chimistes et de physiciens. Il faudra également renforcer les interactions déjà existantes entre les communautés de la physique mésoscopique, de la spintronique, du nanomagnétisme et des calculs *ab initio*.

## 5 – FORTES CORRÉLATIONS ÉLECTRONIQUES

Les systèmes à fortes corrélations, en particulier électroniques, connaissent de nombreux développements expérimentaux et théoriques. La découverte de nouveaux composés aux propriétés très diverses renouvelle continuellement l'étude de problèmes variés tels que la transition métal-isolant, l'origine de la supraconductivité non conventionnelle, le magnétisme quantique, ou la superfluidité. La coexistence au sein d'un même matériau de propriétés parfois antinomiques a donné naissance à de nouvelles directions de recherche telles que les isolants topologiques, isolants en volume mais conducteurs en surface ou les matériaux multiferroïques où les ordres magnétiques et électriques sont présents simultanément. Les études fondamentales sur les systèmes fortement corrélés ont des applications pratiques dans des domaines comme la thermoélectricité, la supraconductivité, les matériaux magnétiques fonctionnels...

Une grande richesse des systèmes corrélés est la possibilité de contrôler au moins de manière partielle les propriétés physiques en jouant sur le dopage chimique, la pression hydrostatique ou le champ magnétique. Dans ce cadre, de nouvelles perspectives sont ouvertes par la possibilité de moduler les propriétés d'échantillons très fins par une tension de grille.

L'étude des composés à fortes corrélations s'appuie sur un ensemble de techniques expérimentales : mesures thermodynamiques ou de transport (électrique, thermique, ou thermoélectrique), méthodes de spectroscopie à l'échelle globale (RMN, RPE, Raman, muons, ARPES, neutrons) ou locale (microscopies et spectroscopies de champ proche), diffractions X ou neutrons, en particulier sur les TGIR.

Toutes ces techniques sont constamment améliorées, en particulier pour les utiliser dans des conditions nouvelles (très fort champ magnétique statique ou pulsé, résolution temporelle, etc.). De nouvelles techniques voient aussi le jour, comme le laser-ARPES capable

d'atteindre des résolutions de l'ordre du meV, donc d'accéder aux énergies caractéristiques des corrélations. Les mesures ARPES de type pompe-sonde à l'aide de lasers femtosecondes permettent, elles, de remonter à la dynamique des électrons. Ces techniques pourraient devenir incontournables pour l'étude de la supraconductivité non conventionnelle et plus généralement des systèmes d'électrons fortement corrélés. Le développement en cours de tels instruments au plan national est donc très important pour rester compétitif au niveau international dans l'étude de ces systèmes.

Sur le plan théorique, des développements méthodologiques (*e.g.* extensions en *cluster* du champ moyen dynamique – DMFT), algorithmiques (*e.g.* Monte Carlo Quantique diagrammatique) ou encore des théories effectives de basse énergie (*e.g.* modèle de dimères quantiques) apportent un gain considérable dans la compréhension globale des diagrammes de phase des composés à fortes corrélations et permettent une comparaison directe avec les expériences.

## 5.1 LES MATÉRIAUX

Un des éléments marquants des dernières années a été la découverte en 2008 d'une nouvelle famille de supraconducteurs à haute température, à base de fer, plutôt que de cuivre, les pnictures. Leur étude pourrait permettre d'élucider l'origine de la supraconductivité à haute température. Pour être présente dans ce domaine très compétitif, la communauté s'est structurée au plan national avec un dialogue permanent entre physiciens et chimistes. Dans ce contexte, il est très important de soutenir la communauté nationale des chimistes tant la synthèse de monocristaux de haute qualité est cruciale sous peine d'un retard souvent fatal dans la compétition internationale.

Un autre sujet en plein développement est celui des oxydes complexes de métaux de transition. Ces matériaux fonctionnels ont de nombreuses propriétés, modulables entre autres grâce à la stœchiométrie en oxygène, et

intéressantes tant du point de vue fondamental qu'appliqué: magnétorésistance géante, filtrage de spin, magnétisme frustré, supraconductivité non conventionnelle, multiferroïcité, propriétés thermoélectriques, etc. Récemment, un progrès important a été de réaliser des hétérostructures d'oxydes fonctionnels en empilant des couches nanométriques avec des interfaces atomiquement abruptes grâce à diverses techniques d'élaboration physique: ablation laser, épitaxie par jets moléculaires, co-pulvérisation réactive, etc. Ces hétérostructures permettent de stabiliser des nouvelles phases et interfaces et d'obtenir de nouvelles fonctionnalités. En particulier, comme pour les semi-conducteurs usuels, on peut créer un gaz électronique 2D de haute mobilité dans des hétérostructures d'isolants de bande (*e.g.* LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>). La possibilité de contrôler par une tension de grille, via le champ électrique créé, les propriétés de ces hétérostructures ouvre de nombreuses possibilités pour réaliser des matériaux à fort potentiel applicatif: électronique tout oxyde, structures multiferroïques artificielles couplant magnétisme et ferroélectricité (BiFeO<sub>3</sub>, YMnO<sub>3</sub>), structures de type SrTiO<sub>3</sub>/Nb-SrTiO<sub>3</sub> présentant des effets thermoélectriques, etc. Sur le plan fondamental, ces hétérostructures artificielles tout oxyde offrent un angle d'attaque original pour l'étude des phases électroniques fortement corrélées, un exemple en étant l'induction de la supraconductivité à l'interface entre deux oxydes isolants.

Les défis expérimentaux dans le domaine restent le développement de méthodes de caractérisation d'interfaces, la maîtrise des défauts dans les couches minces, le contrôle et la mesure de la stœchiométrie en oxygène, ainsi que l'intégration des oxydes avec l'électronique à base de silicium.

## 5.2 LA TRANSITION MÉTAL-ISOLANT

La transition métal-isolant (TMI) est un élément fondamental de la physique des sys-

tèmes à fortes corrélations, en particulier pour des remplissages de bande commensurables ( $1/2$ ,  $1/4$ ...). Les développements théoriques et notamment la DMFT ont permis ces dernières années une amélioration de la compréhension de la physique de cette transition au demi-remplissage.

Des progrès expérimentaux récents ont révélé des propriétés inattendues. On peut citer comme exemples des mesures de photo-émission récemment effectuées en France sur le composé archétype tridimensionnel  $V_2O_3$  qui démontrent que la transition du métal vers l'isolant débute à la surface, et la détermination d'exposants critiques « anormaux » dans des systèmes lamellaires moléculaires. La confirmation d'un tel comportement nécessitera d'étudier d'autres composés tels que les ruthénates. De même, un enjeu pour le futur est de vérifier la prédiction théorique d'une supraconductivité en bordure d'un état d'ordre de charge (dit aussi « CDW-Mott »), en confirmant les résultats préliminaires obtenus dans des systèmes moléculaires à remplissage  $1/4$ .

### 5.3 LA SUPRACONDUCTIVITÉ NON CONVENTIONNELLE

Un enjeu majeur de la recherche actuelle sur la supraconductivité non conventionnelle est son lien, voire sa coexistence, avec d'autres phases ordonnées comme l'antiferromagnétisme. La présence et le rôle des transitions de phase quantiques sont ainsi discutés aussi bien pour les composés à fermions lourds que pour les cuprates, les supraconducteurs organiques et plus récemment les pnictures. 25 ans après leur découverte, des résultats majeurs obtenus récemment en France sur les supraconducteurs à haute température critique remettent en cause certaines idées existantes. Par exemple, l'observation à très fort champ magnétique d'oscillations Shubnikov de Haas suggère que la surface de Fermi est reconstruite dans la phase sous-dopée, dite de pseudogap, des cuprates. Dans cette même phase, des mesures

de diffusion inélastique des neutrons ont démontré la présence d'un moment magnétique attribué à la circulation de courants orbitaux dans les plans  $CuO_2$ . Ces découvertes démontrent le rôle important des phases en compétition avec la supraconductivité dans la physique des cuprates.

Actuellement, un gros effort est centré sur la physique des pnictures avec plusieurs projets régionaux fédérateurs et celui-ci doit se poursuivre. Les corrélations étant plus faibles dans les pnictures que dans les cuprates, la comparaison des deux classes de composés permettra de mieux comprendre le rôle de ces corrélations dans la supraconductivité à haute température.

### 5.4 COMPÉTITION ET COEXISTENCE DES DIFFÉRENTS ORDRES

Une des grandes particularités des systèmes à fortes corrélations est la vaste zoologie d'états fondamentaux accessibles. Ceci conduit à une compétition très forte entre ces états à différentes échelles, macroscopique, microscopique, ou même atomique lorsque le même site est impliqué dans les différents types d'ordre.

À l'échelle macroscopique, la compétition peut induire une séparation de phases comme dans les composés moléculaires, les fermions lourds ou dans les manganites, où elle serait à l'origine de la magnétorésistance colossale. À l'échelle microscopique, elle peut conduire à une modulation du paramètre d'ordre avec un vecteur d'onde précis et la formation de bandes (« stripes ») révélée par diffraction X ou neutronique, microscopie en champ proche ou RMN. Ainsi, la coexistence entre la supraconductivité et le magnétisme, très discutée dans les cuprates, apparaît également dans les supraconducteurs sous fort champ magnétique : phases FFLO dans les supraconducteurs moléculaires, phases supraconductrices ferromagnétiques avec appariement triplet ou phases antiferromagnétiques réentrantes dans les fermions lourds. Enfin,

une coexistence de phases à l'échelle atomique a été observée par RMN dans les pnictures.

La supraconductivité peut aussi être en compétition avec un ordre non magnétique, par exemple avec un état d'onde de densité de charge, comme dans les chalcogénures ou les composés moléculaires. De façon générale, la compréhension de ces phénomènes de compétition ou coexistence est une clef pour mieux cerner l'origine de la supraconductivité non conventionnelle.

Même en l'absence de compétition, deux ordres très faiblement couplés peuvent coexister spontanément, comme dans les composés multiferroïques. Les enjeux actuels sont de mettre en évidence la réalité et l'amplitude du couplage par un ensemble de techniques expérimentales (conductivité optique ou électrique, spectroscopies Raman, imagerie magnéto-optique, etc.), avec comme objectif d'optimiser la synthèse de nouveaux matériaux.

Dans ce domaine, il est souvent difficile de relier les observations, complexes, à des mécanismes fondamentaux sous-jacents. De ce fait, une nouvelle tendance consiste à utiliser le principe des hétérostructures artificielles décrit dans le paragraphe consacré aux Matériaux (en utilisant par exemple des sandwichs ferroélectrique /ferromagnétique ou des jonctions ferromagnétique /supraconducteur).

## 5.5 LES ISOLANTS TOPOLOGIQUES, EFFET HALL QUANTIQUE DE SPIN

Récemment, un grand intérêt a été porté à l'étude des isolants topologiques. Ces systèmes sont isolants dans le volume du matériau, mais possèdent des états de surface métalliques, dont le nombre, caractérisé par un ou plusieurs invariants topologiques, les distingue d'isolants de bande traditionnels. Les isolants topologiques existent en champ magnétique, en deux dimensions (où ils sont le lieu d'un effet Hall quantique de spin, observé dans des puits

quantiques (Hg, Cd)Te), mais aussi en trois dimensions dans des isolants finalement assez communs (à base de Bismuth), comme observé en ARPES. Les isolants topologiques constituent un sujet d'étude fondamental, mais pourraient aussi avoir des répercussions énergétiques pratiques en thermoélectricité.

## 5.6 LE MAGNÉTISME QUANTIQUE ET LE MAGNÉTISME FRUSTRÉ

Les corrélations fortes peuvent conduire à une localisation de Mott des électrons. Les seuls degrés de liberté non gelés sont les spins électroniques, acteurs de nouveaux phénomènes magnétiques. Les fluctuations quantiques et la frustration magnétique sont alors des paramètres pertinents à basse température, notamment à basse dimensionnalité et pour des valeurs faibles du spin. Les deux effets peuvent empêcher une mise en ordre magnétique «classique» et stabiliser des états non magnétiques, comme les cristaux de valence ou les liquides de spin. Ces nouveaux états de la matière ne sont encore que partiellement compris : ainsi, la mise en évidence d'un *smoking gun* théorique ou expérimental pour les liquides de spin, constituerait-elle une avancée importante. De même, comprendre les interactions nécessaires pour stabiliser ces nouveaux états ainsi que les transitions de phase (quantiques ou à température finie) y menant est particulièrement pertinent expérimentalement, tant en présence de variables externes (pression, champ magnétique) qu'internes (dopage).

L'une des caractéristiques des systèmes frustrés est la présence de nombreux états de basse énergie en compétition qui complique l'analyse théorique et expérimentale. Outre les fluctuations quantiques, cette grande dégénérescence peut être levée par des irrégularités structurelles (défauts, encombrement stérique), conduisant à une grande richesse de phases : ordre magnétique, liquide, verre ou encore glace de spins. Récemment, la syn-

thèse de composés très purs et l'utilisation de techniques expérimentales de pointe pertinentes (RMN, neutrons,  $\mu$ SR, champs intenses) ont permis des avancées importantes. Parmi les résultats marquants, citons l'observation de propriétés originales du fondamental (chiralité, dégénérescence topologique), d'excitations magnétiques exotiques (fractionnaires comme les spinons, ou bien monopoles magnétiques dans les glaces de spin) ou de réponse en champ non triviale (plateaux d'aimantation).

Les perspectives consistent, entre autres, en l'étude de la frustration dans des composés 3D à spin 1/2 (territoire largement inexploré), du dopage de phases liquide ou glace de spin (obtention d'une supraconductivité ou d'une transition de Mott inhabituelles) ainsi que du rôle du couplage spin-orbite dans les composés frustrés (relation avec les isolants topologiques).

## 5.7 LES FLUIDES ET SOLIDES QUANTIQUES

Par essence, le terme de fluides ou de solides quantiques s'applique à pratiquement tous les systèmes à fortes corrélations, des liquides de Fermi ou de Luttinger aux cristaux de Wigner électroniques. Dans son acception usuelle, il s'applique aux différentes phases des deux isotopes de l'hélium, en tant que systèmes modèles de bosons ou fermions fortement corrélés, même si les systèmes d'atomes ultra-froids, ou plus récemment, de polaritons, rentrent aussi dans cette catégorie.

Ces deux dernières catégories étant traitées par ailleurs dans ce rapport, nous nous restreignons ici au cas de l'hélium. Plusieurs projets concernent la cohérence superfluide. En phase liquide, le confinement dans divers milieux poreux permet d'étudier l'influence du désordre et de la dimensionnalité sur la superfluidité des deux isotopes. La turbulence superfluide de l'hélium 4 est au cœur d'une action concertée entre différents laboratoires. En phase solide, les efforts se sont concentrés sur la compréhension du phénomène mysté-

rieux de supersolidité, dans lequel la délocalisation d'une partie de la matière à l'intérieur d'un solide quantique résulte probablement d'un certain désordre (dislocations et joints de grain). L'hélium 3 normal reste un modèle irremplaçable de liquide de Fermi en forte interaction, avec de nouvelles études du spectre d'excitation par diffusion de neutrons.

Au-delà de cet aspect purement quantique, l'hélium liquide ou solide est étudié dans de nombreuses sections (2, 4, 5, 6, 8). Du fait de ses propriétés spécifiques, comme de ses faibles interactions avec les autres atomes, il est en effet un système modèle pour l'étude de phénomènes très généraux : transitions de phases et phénomènes critiques, mouillage et imbibition, cavitation, cristallisation, phénomènes prédisruptifs dans les liquides isolants, etc. L'hélium liquide ou solide est également une matrice très peu perturbante permettant d'étudier par spectroscopie les propriétés d'atomes isolés, ou leurs dynamiques internes ou réactives. Enfin, l'hélium 3 liquide fortement polarisé par pompage optique est un modèle de liquide magnétique, dont les nombreuses instabilités de spin sont loin d'avoir été toutes élucidées.

## 6 – MODÉLISATION

Au sein de la section, diverses approches théoriques sont utilisées pour appréhender le comportement quantique des électrons, que ce soit dans la physique des semi-conducteurs (confinement dans les nanostructures, cohérence des excitations de charge ou de spin), le transport (transport balistique, spintronique), les effets de corrélations fortes pilotant les diagrammes de phase (supraconducteurs de basse dimensionnalité ou non conventionnels, composés à fermions lourds, manganites, cobaltates...) les effets de dopage, etc. La difficulté essentielle consiste à prendre en compte les effets de corrélation et/ou de décohérence. Dans le premier cas, une large gamme de

méthodes (exactes ou approximatives, analytiques ou numériques) est disponible, et le choix d'une approche en particulier s'effectue selon l'importance des effets de corrélation, le degré de précision inclus dans le modèle étudié ou le pouvoir prédictif demandé. La décohérence, elle, doit être traitée au travers de modèles phénoménologiques par une combinaison d'approches analytiques et numériques.

Un effort important est porté sur le traitement des effets de corrélation par des modèles théoriques et des simulations *ab initio* quantiques, au-delà des codes à disposition de la communauté (ABINIT, VASP...), que ce soit pour la description de l'état fondamental (y compris le développement de nouvelles fonctionnelles d'échange et de corrélation, par exemple pour décrire les interactions de van der Waals), ou pour traiter les états excités électroniques (développement de méthodes spécifiques : TDDFT, MBPT (GW, BSE, etc.), DMFT, etc.). La France a une place reconnue dans certains de ces domaines. Des efforts méritent d'être renforcés concernant des approches en forte expansion telle que le Monte Carlo Quantique. De façon générale, on est encore loin de pouvoir traiter les systèmes très corrélés de manière routinière.

Les approches *ab initio* sont actuellement développées pour étudier la réponse des systèmes à des perturbations de nature diverse : excitation de phonons et simulation de la réponse Raman, excitation de plasmons et simulation des spectres de perte d'énergie, excitation magnétique et simulation de la réponse RMN, etc. Le traitement du couplage électron-phonon est également important dans la description du transport électronique ou de la supraconductivité.

Toutefois, au-delà de ce niveau quantique *ab initio*, d'autres outils deviennent nécessaires dès que la taille des systèmes augmente, que les temps caractéristiques deviennent plus longs ou qu'une compétition entre divers états fondamentaux se produit. Dans ce but, des techniques semi-empiriques, dont la paramétrisation est effectuée sur des calculs *ab initio*, continuent à être développées, telles les méthodes de type liaisons

fortes, auto cohérentes ou non (Hartree-Fock semi empirique, DFTB, SMA, etc.). Ces techniques sont à la base de la simulation de nano-objets, par exemple des agrégats métalliques ou les aimants moléculaires de plusieurs centaines d'atomes, dont les caractéristiques magnétiques dépendent fortement de la taille, mais aussi de la forme et de la composition chimique. Elles permettent également de décrire les effets d'auto-organisation des agrégats nus ou fonctionnalisés, des interfaces complexes (systèmes hybrides, hétérostructures, couches minces pour l'électronique ou l'électronique de spin, nano-objets en contact avec leur environnement), des objets complexes (empilements twistés de plans de graphène), etc. Enfin, tout à l'autre bout des méthodes quantiques du point de vue du nombre d'approximations, les méthodes de type fonction enveloppe sont toujours très utiles.

Complémentaire à l'approche *ab initio*, le traitement d'hamiltoniens modèles décrivant la physique de basse énergie des systèmes fortement corrélés nécessite souvent une approche numérique. La complexité du problème à  $N$  corps quantique décrit par ces hamiltoniens fait qu'il n'existe aucune méthode de résolution générique et efficace.

Dans certains cas, il est nécessaire de traiter exactement les interactions entre particules, sans approximation. La technique de diagonalisation exacte est en pratique limitée par la croissance exponentielle de l'espace de Hilbert. Pour des systèmes 1D, la méthode du groupe de renormalisation de la matrice densité (DMRG) est alors particulièrement efficace. Des concepts provenant de l'information quantique (états produits de matrice) ont récemment permis des avancées considérables dans cette méthode (traitement de problèmes dépendant du temps, de la température). La généralisation de ces concepts (états produits de tenseurs) pourrait permettre dans un futur proche de s'affranchir de la limite 1D. Pour les problèmes de spins ou de bosons en interaction, les méthodes stochastiques (Monte Carlo Quantique) sont probablement les plus efficaces. Une difficulté fondamentale («pro-

blème de signe») les rend toutefois inopérantes pour les systèmes fermioniques au cœur des considérations de la section (modèle de Hubbard, magnétisme frustré). Une direction future consiste à essayer de minimiser le problème de signe pour les modèles les plus intéressants.

Dans d'autres cas (soit par absence d'alternatives, soit pour des interactions intermédiaires), des méthodes approximatives doivent être développées. Dans cette catégorie figurent les méthodes variationnelles, des méthodes hybrides *ab initio*/corrélations fortes, telles que (LDA ou GW)+DMFT, et le champ moyen dynamique (DMFT) qui a permis des avancées considérables sur le problème de fermions en interaction, en particulier pour expliquer la transition de Mott. La DMFT transforme le problème originel en celui d'un modèle d'impureté quantique plongée dans un bain auto-cohérent. Le modèle effectif est alors résolu par un *solver*, généralement une des méthodes numériques évoquées plus haut. Récemment, le modèle effectif a été affiné en utilisant plusieurs impuretés quantiques (*cluster-DMFT*), et de nouveaux *solvers* numériques (notamment stochastiques) plus efficaces ont été développés. Ces avancées techniques ont permis de décrire en détail plusieurs caractéristiques du diagramme de phase des supraconducteurs à haute  $T_c$ , et aussi d'aborder l'étude de la dynamique des systèmes fortement corrélés, notamment hors équilibre. Elles sont appelées à se développer.

Des efforts importants seront encore nécessaires pour permettre à chacune des communautés *ab initio*, physique mésoscopique et corrélations fortes de s'enrichir mutuellement. Trop souvent, elles s'ignorent. À ce titre, des participations croisées aux réseaux nationaux (GDR CoDFT ou physique mésoscopique, par exemple) ou internationaux (réseau  $\psi_k$ , réseau ETSF...) revêtent une importance toute particulière pour faire émerger les approches hybrides où les résultats obtenus *ab initio* permettraient de guider le choix des paramètres introduits dans les hamiltoniens modèles.

En parallèle à toutes ces approches numériques, il est important de continuer à

développer des approches phénoménologiques, essentielles pour nombre de thématiques centrales de la section (transport quantique et mésoscopique, effets de décohérence induits par des couplages électron-électron, électron-photon, électron-phonon...). En effet, si les techniques numériques et de simulation sont devenues incontournables en tant qu'approches *ab initio* pour déterminer la structure de nanosystèmes ou comme approches adaptées au transport (groupe de renormalisation numérique), elles ne permettent pas de résoudre tous les problèmes. Un exemple en est le transport au travers de nanostructures. Si l'approche sans interactions de Landauer a permis de comprendre une quantité énorme de données expérimentales, un verrou persiste pour le transport en présence de corrélations électroniques fortes et/ou de couplages à d'autres degrés de liberté, donc de décohérence. La difficulté est de relier les états multiparticule corrélés et cohérents de la nanostructure avec les liquides de Fermi et la décohérence dans les électrodes pour en déduire le courant électronique, voire le bruit associé. De telles problématiques, qui ne sont pas accessibles directement aux simulations numériques, sont cependant pertinentes pour de nombreuses situations importantes de transport en dimensionnalité réduite comme par exemple en électronique moléculaire, dans le transport à travers des boîtes quantiques (effet Kondo...), dans les fils quantiques (où des corrélations de type Luttinger deviennent importantes), pour les systèmes nanoélectromécaniques, et en général lorsque l'on s'intéresse à la décohérence. Pour comprendre les mécanismes en jeu et surmonter les verrous conceptuels, il reste donc indispensable de développer des modèles phénoménologiques minimaux judicieusement choisis et de les étudier par une combinaison d'approches analytiques et numériques.

## 7 – TGIR ET INSTRUMENTATION

Dans toutes les disciplines scientifiques, les progrès conceptuels découlent souvent de développements instrumentaux. En physique, on pense bien évidemment aux Très Grandes Infrastructures de Recherche, mais l'innovation technique a aussi lieu à l'échelle des laboratoires. Dans cette section, nous décrivons, parmi les évolutions récentes du domaine, celles qui sont plus liées aux activités de la section, en dégagant quelques points qui nous paraissent mériter des efforts particuliers.

### 7.1 LES TGIR

Les TGIR jouent un rôle majeur de structuration et d'approfondissement de la recherche. Les TGIR sont le lieu à la fois d'innovations techniques (polarisation de la lumière ou des neutrons, environnements champ intense et/ou haute pression, électronique d'acquisition, développement logiciel) et d'échanges interdisciplinaires entre des communautés que seule la technique commune rassemble. Cela permet d'ouvrir de nouveaux axes de recherche aux interfaces disciplinaires.

Par la lourdeur des investissements requis pour atteindre le meilleur niveau mondial, les TGIR doivent bénéficier à la fois d'un financement pérenne, d'une visibilité à long terme sur les objectifs demandés par les tutelles, de la garantie d'une activité de recherche propre de pointe autonome – seule à même de garantir un excellent niveau de service – et d'un support technique suffisant (techniciens, ingénieurs, bureaux d'études).

#### Sources X et neutrons

Les sources synchrotrons de rayons X (Soleil, ESRF) et de neutrons (LLB, ILL) sont largement utilisées pour les thématiques cou-

vertes par la section 6, certains des chercheurs rattachés à cette section contribuant à leur développement et à leur animation. Nous renvoyons au rapport de la section 5 pour une discussion des avancées récentes et des enjeux qui concernent ces TGIR.

#### Champs magnétiques intenses

La section est très présente sur les deux sites du Laboratoire National de Champ Magnétique Intense (LNCMI), issu de la fusion en 2009 du LCMI à Grenoble pour les champs statiques et du LNCMP à Toulouse pour les champs pulsés. La gestion des appels à expériences est désormais assurée par un comité de programme unique, ce qui permet une bonne symbiose entre les deux sites. Un projet d'envergure, dans le cadre européen ESFRI, est l'installation entre l'ILL et l'ESRF d'un laboratoire de champs magnétiques intenses permettant d'effectuer sur site des mesures de rayonnement X et de neutrons (coopération ILL-ESRF-LNCMI). La combinaison de ces différents outils ouvrirait une nouvelle fenêtre pour comprendre le comportement de la matière sous fort champ magnétique.

Un enjeu important pour le futur est de minimiser le courant électrique nécessaire à l'obtention de forts champs dans un volume donné. Ceci est crucial, d'une part pour réduire l'effet de l'augmentation du prix de l'énergie électrique, d'autre part pour étendre l'utilisation de forts champs magnétiques à d'autres disciplines, comme par exemple la chimie (RMN en très fort champ) ou la géophysique (champs élevés dans de gros volumes). Pour répondre à cet enjeu, il faut améliorer la conception des bobines résistives (en particulier leur échange thermique), et développer l'usage de technologies hybrides, combinant bobines résistives et supraconductrices à haute température critique.

#### Centrales de technologies

Nouvellement intégrées aux TGIR, les centrales de technologies sont un outil indis-

pensable pour la communauté. Celles-ci ont été déclinées selon deux typologies : les grandes centrales et les centrales de proximité.

Dans les grandes centrales technologiques, au nombre de six, on retrouve à la fois des moyens de croissance en épitaxie de matériaux classiques (silicium, arséniures, etc.) et des moyens de nanostructuration. Elles concentrent tous les moyens technologiques nécessaires pour la réalisation d'un échantillon depuis le matériau jusqu'au dispositif monté sur une embase. Les personnels techniques qui soutiennent la centrale permettent de conserver de façon pérenne les procédés développés soit par eux-mêmes soit par les chercheurs technologues. Elles sont structurées en réseau et répondent aux demandes des chercheurs de deux façons : soit en guichet, où la fabrication est totalement prise en charge par la centrale, soit en mode plus collaboratif où le chercheur demandeur est impliqué dans la fabrication et, aidé du personnel technique, participe activement à la technologie.

Les centrales de proximité ont un rôle complémentaire. Elles permettent aux chercheurs de laboratoires proches disposant souvent de moyens de croissance plus spécifiques, un accès rapide à une technologie moins complexe, ou de combiner plus facilement des techniques hybrides.

Un soutien financier pérenne de ces centrales est absolument nécessaire pour maintenir leur potentiel à la pointe de la technologie. Le futur du LPN qui joue un rôle important pour de nombreux laboratoires de la section est en particulier un sujet qui nous préoccupe.

## 7.2 INSTRUMENTATION

Le terme d'instrumentation recouvre aussi bien le développement de nouveaux systèmes que les approches méthodologiques basées sur l'utilisation de systèmes commerciaux, en passant par l'assemblage de dispositifs commerciaux dans un système original. Au cours

du temps, on passe souvent d'un cas à l'autre. Ainsi, les microscopes STM (Scanning Tunneling Microscope) et AFM (Atomic Force Microscope, AFM), complètement construits dans les laboratoires il y a une vingtaine d'années, sont désormais disponibles commercialement. De même, les réfrigérateurs à dilution  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  utilisés pour obtenir des températures inférieures à 0,3 K peuvent être achetés sur plan auprès de différentes entreprises spécialisées. Cette situation, conjuguée à la montée en puissance du financement sur contrat, qui pousse à acheter plutôt qu'à développer, conduit certains à remettre en question l'intérêt de maintenir une forte compétence en instrumentation scientifique au sein des laboratoires fondamentaux. Or, la capacité à développer une instrumentation originale est un des éléments, d'une part de la compétitivité scientifique internationale, et d'autre part des progrès aux interfaces des disciplines. Les exemples, non exhaustifs, qui suivent, illustrent quelques-uns des défis qui ne pourront être relevés qu'en renforçant la place de l'instrumentation au sein des laboratoires.

### Sondes de proximité

L'avènement il y a un quart de siècle des microscopies en champ proche a bouleversé le paysage de la recherche en matière condensée. Basées sur la détection d'un signal issu d'une interaction à courte portée entre une sonde fine (une pointe) et l'objet d'études (surface, nano-objets etc.), ces microscopies ont permis, non seulement une observation aisée du nanomonde, mais également l'étude de celui-ci par l'analyse fine – spectroscopie – de l'interaction sonde-objet. Ces sondes apportent des contributions majeures à la compréhension des systèmes à fortes corrélations comme à celle des nano-objets. En effet, elles permettent d'accéder, à l'échelle microscopique, aux modulations ou aux hétérogénéités d'un paramètre d'ordre (densité électronique dans les ondes de densité de charge, paramètre d'ordre supraconducteur, etc.) ou encore, de remonter à la symétrie du paramètre d'ordre à partir de mesures spectroscopiques locales. Elles

donnent également accès aux propriétés de nano-objets individuels au sein d'une collection hétérogène, en s'affranchissant des effets de moyenne des mesures d'ensemble. À ce titre, elles sont aujourd'hui couramment employées pour le suivi *in situ* de la croissance de nanostructures en surface, dans l'analyse de leur morphologie et dans l'étude de leurs diverses propriétés locales. En permettant une nanostructuration des surfaces, elles sont également au cœur des approches du type «bottom-up». Ainsi, elles sont devenues incontournables dans la plupart des domaines associés à la section.

Trois tendances de fond sont à souligner :

La première consiste à placer les microscopes en champ proche dans un environnement parfaitement contrôlé : ultravide (ou milieu liquide) pour éviter la dégradation des surfaces ou des nano-objets par l'air ambiant, basse température pour révéler les propriétés quantiques, ou une combinaison des deux. Dans ce domaine en pleine expansion, on constate une «démocratisation» de ces outils performants et leur arrivée massive dans des laboratoires de la matière condensée. Certaines équipes, à la pointe de ce progrès, vont encore plus loin, en mettant au point les microscopes fonctionnant à très basse température (jusqu'à quelques dizaines de millikelvins) et dans des champs magnétiques de plusieurs teslas.

La deuxième tendance, plus instrumentale, s'articule autour du développement de nouvelles microscopies et spectroscopies en champ proche, en exploitant diverses interactions à courte portée. À travers ces interactions, de nouvelles propriétés des nano-objets sont étudiées, comme les interactions interparticules, leur propagation, la portée des interactions, les propriétés de cohérence. Ces nouvelles microscopies en champ proche sont diverses (microscopies à sonde magnétique, électrostatique, à sonde de Kelvin, en champ proche optique, d'électrons balistiques et polarisés en spin) et ne cessent de s'améliorer. Ainsi, des améliorations significatives en détection de courants tunnel ont permis l'étude de molécules uniques, de leur couplage avec divers environnements (substrats métalliques, semi-conduc-

teurs ou isolants ultra-minces), de leurs spectres vibrationnels, etc. Un autre exemple est la fonctionnalisation des pointes STM (ou sondes AFM). On peut ainsi réaliser une spectroscopie tunnel résolue en spin, utilisable pour l'étude du magnétisme des nano-objets individuels de la spintronique.

La troisième voie consiste à utiliser la sonde d'un microscope en champ proche comme un moyen de perturber très localement un objet unique pour en mesurer la réponse. Elles sont très répandues en optique en champ proche (l'exaltation du champ au voisinage de la pointe métallique fine permettant une détection en champ lointain). Ces approches commencent à être employées dans d'autres domaines : l'étude de l'influence du champ électrique local sur le comportement d'un nano-circuit cohérent par microscope à balayage de grille en est un exemple.

## Détection à basse température

De l'astrophysique à la physique des particules en passant par la biologie et l'imagerie médicale, de nombreux domaines utilisent des détecteurs refroidis pour gagner en résolution, sensibilité, ou vitesse, soit à travers la réduction du bruit thermique, soit à travers des effets spécifiques aux basses températures comme la supraconductivité. Des bolomètres à semi-conducteurs refroidis en dessous de 100 mK sont ainsi utilisés pour détecter la matière noire (30 kg de bolomètres refroidis à 20 mK dans Edelweiss II) ou pour la mesure de l'anisotropie du fond diffus cosmologique (satellite Planck), des détecteurs à base de jonctions Josephson donnent accès à l'infrarouge lointain, etc.

Parmi les enjeux actuels figurent la mise au point de matrices de détecteurs pour l'imagerie (médical, astrophysique...), et de méthodes de multiplexage pour lire ces matrices avec un nombre limité de connexions électriques, le développement de nouveaux concepts de détection, mettant en jeu supraconductivité (détecteurs à inductance cinétique), physique mésoscopique (mesure de

charge), ou superfluidité (bolomètre à He<sup>3</sup> superfluide), et celui de détecteurs couplés mesurant charge et énergie (discrimination de la matière noire). Dans ce domaine, où les progrès dépendent souvent d'un accès aux centrales de nanofabrication, le paysage national est bien structuré, avec de nombreuses collaborations entre organismes, et l'existence d'une communauté bien identifiée.

## Cryogénie

La détection à basse température nécessite également d'atteindre des températures inférieures à 4 K. Si les méthodes associées sont bien établies, l'utilisation de la cryogénie aux interfaces nécessite souvent le développement de solutions spécifiques dans lesquelles le maintien de l'expertise des laboratoires maîtrisant les basses températures est essentiel. Edelweiss II, déjà cité, a nécessité la conception et la construction d'un réfrigérateur à dilution spécialement adapté. Le projet Eureca de détection de la matière noire impliquera le refroidissement de plusieurs tonnes de détecteurs à une dizaine de millikelvins. À une échelle beaucoup plus modeste, le développement de réfrigérateurs 1 Kelvin spécifiques est indispensable à la mise en œuvre de concepts innovants, allant de la gravure FIB à l'imagerie médicale par RMN.

À côté de solutions traditionnelles, certains projets ont fait germer de nouvelles solutions, comme la dilution sans gravité pour la cryogénie spatiale ou la nanoréfrigération de nanostructures par effet Peltier supraconducteur... C'est un domaine en évolution, et dont l'importance pourrait être renforcée par les incertitudes qui pèsent sur l'approvisionnement en <sup>4</sup>He, mais surtout en <sup>3</sup>He. Dans ce contexte, on peut aussi s'attendre à une évolution des techniques alternatives (tubes pulsés) dans laquelle il serait stratégique de développer des synergies entre le CNRS et les autres organismes.

## RMN à très haut champ

Les champs magnétiques intenses permettent des gains très significatifs en sensibilité

et en résolution en RMN. Actuellement, une convergence d'intérêts se dessine autour de la RMN en champ très intense, rapprochant chercheurs en science des matériaux, chimie ou biologie d'un côté et physiciens de la matière condensée de l'autre.

Les premiers bénéficient d'une TGIR «RMN très hauts champs» (jusqu'à 23,5 Tesla). Les seconds, initialement motivés par les états électroniques ou magnétiques nouveaux induits par le champ dans les systèmes d'électrons corrélés, ont déjà repoussé les limites de la RMN dans les aimants résistifs continus (34 T au LNCMI-Grenoble). Un projet de RMN en champ pulsé (60 T) est également en cours de développement au LNCMI-Toulouse.

Les retombées en instrumentation RMN (sondes, électronique GHz, stabilisation des fluctuations temporelles du champ par «spin-lock» RMN, etc.) permettent aujourd'hui d'employer la RMN en champ résistif pour la chimie et la science des matériaux. Les perspectives de progrès sont encore grandes avec l'importation de techniques haute résolution (rotation à l'angle magique, etc.) dans ces champs résistifs. À l'inverse, d'autres projets visent à exporter les techniques RMN spécifiques de la physique du solide (basses températures, champ variable, etc.) dans le domaine de la chimie ou de la biologie pour l'observation des noyaux d'ions paramagnétiques.

## Hautes pressions

Les techniques de pression permettent de mettre en évidence des phénomènes physiques remarquables (record du monde de température critique d'un supraconducteur, étude de points critiques, etc.). Si les cellules à enclumes diamant représentent la seule technologie possible pour les mesures de type diffraction (RX, synchrotron, neutron, Raman, etc.), les mesures de RMN et de transport électrique et thermique font également appel aux cellules à pression de gaz ou à clamp. Le «réseau hautes pressions» du CNRS fédère les différentes communautés utilisant la pression (Physique, Chimie, Sciences de la Terre, etc.) ce qui permet un échange technologique fructueux.

Dans le futur, la pression restera un outil de premier plan pour explorer de nouveaux états électroniques à toute température, permettant ensuite la synthèse de nouveaux composés, ou pour étudier les points critiques. Il faudra veiller à maintenir l'environnement spécifique nécessaire pour adapter cette technique aux environnements délicats (champs magnétiques intenses – pulsés en particulier –, spectroscopie Raman, conductivité optique, etc.), que ce soit en laboratoire ou dans les TGIR.

## 8 – APPLICATIONS

Les applications des systèmes étudiés par la section sont souvent développées en interaction avec d'autres sections, en particulier la section 8, ou en collaboration avec d'autres acteurs, institutionnels ou industriels. Sans prétendre donner un panorama exhaustif, quelques exemples permettent d'illustrer la richesse des études menées dans les différentes thématiques décrites ci-dessus.

La physique des semi-conducteurs est au cœur de nombreuses recherches à visée applicative : éclairage blanc, composants de puissance, optoélectronique, photovoltaïque, etc. Ainsi, les diodes à base de GaN et les hétérostructures associées (GaN/AlN, GaN/InN) occupent-elles maintenant la deuxième place derrière le Silicium en termes d'applications. Le passage de l'UV au bleu, et bientôt au vert, a reposé sur la levée de plusieurs verrous scientifiques (compréhension des champs piézoélectriques, réduction des effets Auger). Le ZnO et ses hétérostructures souffrent encore de la difficulté d'obtenir un dopage p. Mais la grande valeur des énergies de corrélation électron-trou peut conduire à des propriétés originales, même à température ambiante.

Dans le domaine de l'infrarouge proche, l'utilisation de boîtes quantiques à base de GaAs ou d'InP permet d'augmenter la fréquence de répétition par rapport aux systèmes à puits quantiques. Mais l'intérêt primordial est

que la qualité et le contrôle des échantillons permettent de comprendre l'ensemble des phénomènes physiques en jeu et d'identifier ceux limitant l'efficacité.

La section contribue également à améliorer les performances des dispositifs électroniques à base de semi-conducteurs, à travers les ruptures avec les technologies et les concepts existants. C'est le cas des composants habilités à travailler dans des conditions extrêmes (température, pression, environnement chimique, puissance). Des recherches amont destinées à améliorer les propriétés de transport des matériaux grand gap sont nécessaires de ce point de vue, aussi bien sur le diamant que sur les polytypes de SiC, le GaN, et ZnO.

En imaginant des processus nouveaux d'oscillation dans les nanotransistors, on sait depuis peu générer des radiations térahertz dans un schéma de transport électronique, alternatif au schéma optique des lasers à cascade. Cette idée, issue de la physique théorique il y a une dizaine d'années, est maintenant confirmée dans toutes les filières de la nanoélectronique (Silicium, GaAs, GaN) et est sur la voie du développement industriel. L'amélioration de leur efficacité passera par la résolution de nombreux problèmes fondamentaux : disparition de modes inutiles, meilleur couplage aux antennes, etc.

La miniaturisation des dispositifs nanoélectroniques repose sur de nombreux concepts de la physique mésoscopique. Ce domaine est également très important pour le développement de dispositifs alternatifs à la technologie actuelle, opérant éventuellement dans le régime cohérent. Des efforts concrets existent déjà dans les contextes de la nanomécanique et de la nanoélectronique. Enfin, les effets de la physique mésoscopique sont au cœur de la métrologie moderne.

Les matériaux magnétiques sont d'une grande importance dans des applications liées à la transformation de l'énergie. Les matériaux magnétiques durs permettent la fabrication de moteurs électriques de très haute densité énergétique, importants pour la traction automobile et la génération d'électricité (éoliennes).

La priorité ici est la recherche de nouveaux matériaux dont les propriétés de coercivité seraient préservées jusqu'à 180 °C et au-dessus. Dans le domaine des matériaux magnéto-caloriques qui pourraient remplacer progressivement les fluides utilisés dans les systèmes frigorifiques ou les pompes à chaleur, l'objectif est de mettre au point des matériaux dont les propriétés magnétiques varient fortement dans un domaine étroit de températures. Ce type de recherches tirerait un grand bénéfice d'études fondamentales en amont, malheureusement encore trop peu nombreuses.

L'utilisation d'agrégats moléculaires ou molécules-aimants pour des applications industrielles comme le stockage de très haute densité, ou, dans un futur lointain, les ordinateurs à logique quantique, se heurte à de nombreuses difficultés qu'il faudra surmonter : réaliser des barrières d'énergie plus élevées, surmonter les phénomènes de décohérence quantique, organiser proprement les molécules sur des supports, etc. En revanche, certaines molécules (matériaux photomagnétiques à transition de spin) possèdent deux états de spin séparés par une barrière d'énergie trop élevée pour être franchie à température ambiante. Elles permettent d'ores et déjà de réaliser des systèmes magnétiques bistables manipulables par activation thermique ou optique (capteurs ou actuateurs) et d'envisager un stockage haute densité à température ambiante.

En spintronique, la première grande classe d'applications se situe dans le domaine des capteurs. L'utilisation de la magnéto-résistance géante ou tunnel dans les têtes de lecture des disques durs en est l'exemple le plus connu, mais il n'y a plus d'acteurs de l'enregistrement magnétique en Europe. Par contre, au niveau de l'hexagone, des équipes académiques et des industriels travaillent en partenariat pour développer des capteurs pour l'automobile, le médical, le contrôle non destructif et le spatial. Un autre domaine d'importance est celui des mémoires magnétiques non volatiles (MRAM) dont la deuxième génération utilisera la technologie du transfert de spin, phénomène exploité aussi pour la réalisation

de nouveaux composants radiofréquences. Enfin, des perspectives prometteuses apparaissent pour la logique magnétique programmable et les memristors pour la simulation de réseaux neuronaux.

La plupart des systèmes à fortes corrélations débouchent sur des applications potentielles. On peut citer les propriétés thermoélectriques remarquables de nombreux composés à fortes corrélations (clathrates, skutterudites, alliages d'Heusler, phases de Chevrel ou oxydes, mais aussi isolants topologiques comme  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , le seul matériau ayant connu un développement industriel significatif), les applications de la supraconductivité au stockage et au transport de l'énergie, la possibilité d'utiliser le pilotage de la transition métal-isolant des manganites par un champ pour réaliser de nouvelles mémoires non-volatiles, les RRAM (Resistive Random Access Memory), les matériaux multifonctionnels comme les multiferroïques, etc.

Exploiter au mieux ces nouvelles possibilités nécessite d'élucider le rôle des divers effets physiques (par exemple pour les applications thermoélectriques, dimensionnalité, taille finie, corrélations électroniques et couplage spin-charge-réseau) et de comprendre les mécanismes sous-jacents. Ceci passe par une étroite collaboration entre chimistes, physiciens expérimentateurs et théoriciens, dans laquelle les chercheurs de la section ont toute leur place.

## 9 – CONCLUSIONS

L'image globale qui se dégage de ce panorama est celle d'une recherche dynamique, en prise sur les évolutions de la physique de la matière condensée à l'échelle internationale. Un point frappant est le développement des interactions entre communautés, au sein de la section comme entre sections. Il faut souligner le rôle essentiel qu'ont les différents GDR à cet égard. À des échelles dif-

férentes, mais toujours pertinentes, les GDR structurent des communautés, jettent des ponts entre différents domaines, contribuent à l'émergence de nouveaux sujets, ou favorisent l'ouverture vers les industriels. Il est important de veiller à ce qu'ils continuent à bénéficier d'un soutien financier significatif.

Les succès présents ne doivent pas faire oublier que les résultats obtenus ont été construits sur toute une culture, aussi bien théorique qu'expérimentale. Ainsi, les concepts à la base de la physique du graphène ont été énoncés dès les années 1950. De même, les condensats de polaritons sont le fruit de nombreuses années d'efforts expérimentaux. Enfin, l'essor de l'électronique de spin, reconnu récemment par des prix Nobel dont un français, est en particulier bâti sur des études fondamentales menées dans les années 1970. Ces quelques exemples montrent toute l'importance d'une continuité dans l'expertise scientifique, au-delà d'effets de mode qui tendent à focaliser une quantité importante des ressources sur quelques sujets chauds.

De ce point de vue, il faut veiller aux conséquences de la montée en puissance du financement sur projet à court terme à travers l'ANR (depuis 2005) ou d'autres actions contractuelles. Dans la situation hautement compétitive actuelle (taux de succès des projets ANR inférieur à 25%), et compte tenu d'une tendance actuelle à vouloir jauger la qualité à travers des indicateurs chiffrés (bibliométrie réductrice), les chercheurs pourraient être tentés de renoncer aux sujets à la marge, et de se concentrer sur les sujets les plus étudiés. Cela risquerait de conduire à une perte de l'expertise collective, et également du savoir-faire instrumental, dans la mesure où, pour publier rapidement, il vaut souvent mieux acheter des appareils existants que de développer des instruments innovants. Par ailleurs, la diminution du taux de succès des projets ANR conduit à augmenter le temps passé à rédiger ou à évaluer les différents projets. On est aussi en droit de s'interroger sur l'apport réel de l'AERES à l'évaluation des unités rattachées au CNRS. Le sentiment qui se dégage dans le périmètre scientifique de la section est plutôt celui

d'un appauvrissement global de l'évaluation des unités, engendré notamment par l'absence d'élus C et de représentants des sections secondaires dans les comités de visite. Il conviendrait d'évaluer l'efficacité globale du nouveau dispositif (ANR et AERES) pour les performances et la réactivité de la recherche nationale. En tout état de cause, il est important de maintenir un niveau de financement conséquent, sans fléchage a priori, des ANR blanches.

Dans le futur, il sera essentiel de préserver les différentes expertises scientifiques au sein du paysage national, comme les capacités à prendre des risques au niveau collectif et à développer des nouveaux axes originaux de recherche. La nouvelle autonomie des Universités et la possible compétition interuniversitaire en résultant sera-t-elle un facteur positif ou négatif de ce point de vue? En l'absence de réponse évidente, le CNRS, qui a démontré ses capacités à organiser la diversité et la cohérence de la recherche au niveau national, et parfois local, doit rester au cœur du dispositif national de recherche. Ceci suppose un solide budget récurrent, permettant de financer des opérations à long terme dans les UMR comme dans les UPR, et des moyens de recrutement à la hauteur de ses missions.

Au sein du CNRS, les sections dépendant de l'INP, et en particulier la section 6, sont impliquées dans nombre de collaborations trans-instituts. Il faudra prendre garde à ce que ces activités aux interfaces ne soient pas handicapées par la nouvelle organisation. Les laboratoires évoluent également, dans le sens de regroupements au sein d'instituts élargis. Si ces regroupements ont des avantages indéniables lorsqu'ils sont pertinents, ils risquent de conduire mécaniquement à une disparition des activités « minoritaires » par rapport aux axes fédérateurs. Là aussi, le CNRS a un rôle structurant à jouer.

Une recherche performante repose sur des moyens humains de qualité travaillant dans de bonnes conditions. Nous souscrivons de ce point de vue aux recommandations de la section 2, en y ajoutant un point spécifique, celui du potentiel technique des laboratoires. Si la sous-traitance permet dans une certaine

mesure de réduire les besoins en niveaux T et AI, dans nombre de domaines, l'expérience montre tout l'apport des personnels à ce niveau de qualification, aussi bien pour la sou-

plesse et la réactivité que pour la pérennité de l'expertise technique. Il nous semble important que cet apport soit mieux reconnu dans les carrières qu'il ne l'est actuellement.



# SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION (INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE, SIGNAL ET COMMUNICATION)

*Président*

Bruno DURAND

*Membres de la section*

Frédéric BIMBOT

Isabelle BLOCH

Ali CHARARA

Jean-Noël CHARDRON

Christine CHEVALLEREAU

Alain DENISE

Étienne DOMBRE

Pascal DUBREUIL

Chantal ENGUEHARD

Jean-Luc GAUVAIN

Blaise GENEST

Marc-Olivier KILLIJIAN

Bertrand MAZURE

Stephan MERZ

Serge MIGUET

Gilles MOUROT

Amedeo NAPOLI

Hervé RIVANO

Marie-Christine ROUSSET

Philippe SCHNOEBELEN

Alexandros TSOUKIAS

## 1 – INTRODUCTION

Afin de résumer les tendances et les enjeux des sciences de l'information, nous avons adopté dans ce rapport une structure partant des thèmes de recherche fondamentaux pour aller jusqu'aux interactions avec d'autres domaines. Nous introduisons d'abord les disciplines qui soutiennent la plupart des thèmes décrits (traitement du signal, automatique, logique, sémantique, combinatoire, graphes, systèmes). Le thème du calcul effectif est ensuite développé, avec ses aspects de grilles, réseaux, ingénierie du logiciel, systèmes, vérification, sécurité et fiabilité, systèmes embarqués. Nous avons choisi deux thèmes de recherche à l'interface de l'informatique et du monde réel, avec leurs applications en ingénierie : robotique et sciences et technologies de la décision. La section suivante est dédiée aux interactions avec le monde environnant, et porte sur le traitement des images et la vision par ordinateur, les interactions homme-machine, la réalité virtuelle et augmentée, et le traitement des langues. Sont enfin développés certains thèmes interdisciplinaires dont les enjeux sont majeurs, comme la bio-informa-

tique, le développement durable et les systèmes d'information. Nous concluons sur une brève analyse des forces et faiblesses de nos disciplines.

## 2 – FONDAMENTAUX

### 2.1 SIGNAL

En traitement du signal, les problèmes sont de plus en plus formulés de façon intégralement numérique dans la mesure où la numérisation est de plus en plus intégrée au capteur. Ce changement de paradigme a fait évoluer le domaine de manière importante. Un des points forts des approches récentes est d'associer des modèles de représentation dans différents types d'espaces à des méthodes de modélisation et d'analyse mathématique et à des algorithmes, faisant ainsi le pont entre des aspects mathématiques et des aspects informatiques. Les orientations actuelles ont souvent des spécificités liées au domaine. Par exemple l'analyse du signal audio ou musical vise des tâches couvrant la description, la caractérisation ou la transcription automatique, la reconnaissance, la synthèse, la fouille et l'indexation, la séparation de sources, le suivi de la voix, etc.. En traitement de la parole, les méthodes d'analyse, de reconnaissance et de synthèse vont désormais de pair avec le développement du traitement des langues (voir cette partie dans le rapport), tout en gardant un ancrage fort dans la modélisation statistique. Les méthodes de traitement du signal sont également utilisées en traitement d'images, surtout pour les traitements de bas niveau tels que la restauration ou le filtrage. Cependant, les spécificités du domaine, en particulier la dimension spatiale de l'information manipulée, l'importance croissante de la prise en compte de connaissances sur le contexte, et l'évolution des problématiques vers des tâches de haut niveau (reconnaissance de structures, indexation, interprétation sémantique), ont fait de l'image

et de la vision par ordinateur une discipline à part entière, et une section lui est consacrée dans ce rapport. Dans un tout autre domaine, le traitement du signal s'étend au traitement et à l'analyse de séries temporelles quelconques, avec en particulier des applications en finance. Le lien entre traitement du signal et communications numériques permet également de revisiter les questions de codage, d'estimation et de théorie de l'information pour les nouveaux systèmes de communication. Parmi les techniques émergentes, citons les codes espace-temps, ou encore la théorie des grandes matrices aléatoires. Ce lien se retrouve dans la problématique des réseaux de capteurs, avec des questions théoriques sur le traitement statistique distribué. Le thème des représentations parcimonieuses est devenu un sujet phare, visant à faire face à la taille croissante des données en choisissant des espaces de représentation adaptés (typiquement des bases selon lesquelles le signal peut être décomposé avec un petit nombre de coefficients non nuls). Enfin, la multi-modalité se développe de plus en plus, dans de nombreux domaines, par exemple en biométrie, en fouille de données sur le web ou dans le traitement de signaux et de données dans le domaine médical.

### 2.2 AUTOMATIQUE

Science des systèmes, l'Automatique voit se rencontrer en son cœur les notions de système et de dynamique. Elle se fonde sur le concept d'action, dans le sens de la modification du comportement naturel d'un système, et s'appuie pour ce faire sur des thèmes fondamentaux en modélisation, identification, observation, commande et diagnostic. Elle combine des méthodologies analytiques et numériques, manipule des signaux hybrides continus et discrets, maîtrise la complexité, la dimension et l'hétérogénéité des systèmes auxquels elle se confronte. L'Automatique s'appuie sur des outils mathématiques, informatiques, de recherche opérationnelle et sur ses propres outils. Enfin, l'essence de l'Automa-

tique réside dans la dualité entre les systèmes physiques auxquels elle s'adresse et le fait que les avancées majeures ne peuvent venir que du développement de méthodologies génériques, indépendamment de l'application pressentie. Il y aurait ainsi tout autant de risque à vouloir décliner l'Automatique sous forme d'un objet de recherche que de renoncer à la multiplicité naturelle des outils pour résoudre les problèmes que l'Automatique soulève.

Les enjeux sociétaux auxquels l'Automatique doit se confronter peuvent être ré-exprimés en termes de défis scientifiques : la maîtrise des grands systèmes dynamiques interagissant ; la prise en compte des hétérogénéités pour la commande et la prédiction ; l'assurance de la sécurité et des performances des systèmes contrôlés dans des environnements incertains ; l'intégration de nouvelles technologies dans les systèmes de contrôle commande ; la maîtrise des systèmes autonomes et embarqués, avec en particulier les aspects liés à la reconfiguration et la re-calibration des lois de commande ; la réduction des coûts de validation des lois de commande. L'Automatique assume les nouveaux défis de l'information, de la communication et des nanotechnologies, à la fois au niveau de nouveaux axes de recherche associés (commande des réseaux, utilisation des nouveaux matériaux pour la commande) mais aussi d'axes applicatifs (véhicules intelligents, réseaux de capteurs,...)

Des axes de recherche interdisciplinaire ont vocation à prendre une importance considérable dans un futur proche. C'est le cas pour les recherches en Biologie et Automatique (modélisation, observation, analyse des interconnexions dynamiques dans les systèmes biologiques). Les problèmes se déclinent dans un contexte multi-échelle, de l'ADN jusqu'au niveau macroscopique d'une population bactérienne tant dans un contexte d'analyse que de contrôle. De la biologie au biomédical, on passe de la compréhension au niveau cellulaire au développement de nouvelles technologies pour l'aide aux gestes médico-chirurgicaux, à la télé-opération, au développement de prothèses et de muscles artificiels (en lien avec la

robotique). En même temps les grands domaines d'interface de l'Automatique restent des moteurs puissants pour les développements méthodologiques amont, que ce soit autour de l'automobile, des véhicules aériens ou autonomes, des réseaux électriques, de l'environnement, etc.

## 2.3 STRUCTURES FONDAMENTALES

Les structures fondamentales en informatique sont les arbres, les graphes, et les tableaux. Ce sont les ingrédients de bases des algorithmes et des modèles - aussi bien d'architectures matérielles que logicielles. Différentes spécialités s'occupent de leur analyse, de leur conception, de leur utilisation ou de leur optimisation, se posant donc des questions de nature différente.

Tout d'abord, la logique s'occupe de décrire les formalismes pour exprimer des connaissances ou des propriétés de ces structures. Elle s'attelle en particulier à l'analyse de la déduction dans ces formalismes (théorie de la démonstration). Ce dernier point la rapproche du domaine connexe de la sémantique, qui abstrait la syntaxe de chaque langage de programmation en un morphisme d'une structure sémantique, unifiant de facto programmes et preuves (correspondance de Curry Howard). Une question fondamentale est de trouver les bonnes structures sémantiques, et d'analyser leurs propriétés. Un des défis de la discipline est de représenter, de manière cohérente, différents types de programmes, par exemple les programmes concurrents.

La Combinatoire énumère les objets de ces structures fondamentales ayant certaines propriétés, et tente de les dénombrer. Ainsi, il est possible de générer aléatoirement des objets, mais aussi de considérer les limites asymptotiques en moyenne d'opérateurs sur ces objets. La combinatoire s'efforce également de trouver des relations bijectives entre objets, ce qui permet en particulier de résoudre les questions d'énumération et de dénombrement,

mais renseigne aussi sur la nature intrinsèque des classes de structures. Les travaux de combinatoire enrichissent depuis longtemps l'optimisation combinatoire. Elle se développe maintenant de plus en plus en liens avec la physique théorique.

La structure « graphes » joue un rôle particulier. En effet, d'une part la combinatoire des graphes est englobée dans la théorie des graphes, qui a une très longue tradition en France, ce qui lui confère le statut de domaine à part entière. D'autre part, de très nombreux problèmes peuvent se ramener à un problème de coloration d'un graphe, les plus évidents étant des problèmes de communication. Une question fondamentale est celle de la décomposition des graphes : la représentation d'un graphe dans une structure plus simple. Les questions sous-jacentes sont de comprendre quelles classes de graphes se décomposent dans la structure la plus simple, et de calculer le coût de la transformation.

Enfin, les théories de la complexité algorithmique et de la complexité intrinsèque (Kolmogorov) sont fondamentales pour mesurer la difficulté d'un problème en termes de temps et d'espace ou de quantité d'information. Les outils utilisés sont la théorie des automates, la théorie de la calculabilité, et au delà, celle des modèles géométriques comme les pavages, modèles qui expriment la nature géométrique du calcul. Ces théories, une fois combinées à des mesures de probabilité, de temps etc., permettent aussi de spécifier ou d'analyser des phénomènes continus. Cela permet de prendre en compte l'incertitude, le comportement hybride discret/continu, de calculer des coûts en moyenne plutôt que dans le pire de cas, etc. Le mélange de ces aspects discrets et continus ouvre de nouvelles perspectives qui nécessitent des compétences variées assez rares. Une nouvelle interface entre les mathématiques appliquées et l'informatique théorique semble en émergence ici.

## 3 – RÉSEAUX, SÉCURITÉ, ALGORITHMIQUE

### 3.1 ALGORITHMIQUE

Les algorithmes sont des outils utilisés bien au-delà de la seule section 07. Ainsi, l'algorithmique a des retombées dans des domaines aussi divers que les télécommunications, l'image, la bioinformatique, la mécanique ou la physique. La plupart des algorithmes manipulent les structures fondamentales décrites ci-dessus. D'autres portent sur des structures particulières. C'est le cas de la géométrie algorithmique, qui manipule des concepts géométriques, mais peut être utilisée dans des problèmes plus généraux. Un des nouveaux enjeux est la croissance de la taille des données à traiter et leur caractère potentiellement évolutif. Pour combattre la complexité due à la grande taille des données, des familles d'algorithmes permettent d'obtenir des solutions approchées avec des garanties de qualité. L'utilisation de méthodes aléatoires a introduit de nouvelles classes d'algorithmes dont les résultats sont « garantis » par des ratios. L'utilisation de l'aléa permet aussi de résoudre des problèmes plus rapidement que de manière déterministe. Ces algorithmes sont souvent utilisés en algorithmique du texte et du génome ainsi qu'en image, calcul symbolique ou physique théorique.

La complexité des programmes et systèmes qui traitent de la dynamique des systèmes fait de la fiabilité un enjeu difficile à accomplir. Pour cela, la vérification formelle se voit compléter par la théorie des jeux, afin de prendre en compte l'environnement, imprévisible et modélisé à des niveaux variables.

Enfin, l'algorithmique quantique produit un nouveau champ de recherche tirant partie des possibilités offertes par la physique quantique pour offrir des modèles de calculs plus efficaces. L'application phare est la décomposition en nombres premiers, qui a des implications fortes en cryptologie. Le défi est de

développer une complexité quantique pour de problèmes dans d'autres champs que l'arithmétique. Si l'ordinateur quantique ne semble pas être réalisable dans un futur proche, il faut noter que l'approche quantique a permis de résoudre des problèmes algorithmiques non quantiques.

### 3.2 RÉSEAUX

Le caractère ubiquitaire, perversif et l'intelligence ambiante sont au cœur des réseaux de nouvelle génération. En effet, ceux-ci se diversifient et s'enrichissent en bénéficiant d'apports technologiques croisés : réseaux de capteurs à très faible consommation, grilles de calculs à haute performance, grilles de stockage, communautés virtuelles, réseaux micro-cellulaires, etc. De cette diversité émergente des comportements et de nouveaux usages qui s'accompagnent de problématiques de passage à l'échelle en termes de complexité, dynamique et hétérogénéité, et de nouveaux besoins en termes de sécurité et de performance. Ces travaux sont l'occasion de recherches sur les grands réseaux d'interactions et des passerelles vers la physique, les sciences humaines et sociales, l'épistémologie etc.

La complexité d'Internet s'est déportée vers sa périphérie et est caractérisée par la mobilité des terminaux, la diversité de leurs capacités de communication et leur densité, rendant réaliste l'hypothèse d'utiliser ces entités terminales comme un prolongement naturel d'Internet capables de s'affranchir d'un recours systématique aux infrastructures pour l'échange d'informations entre entités terminales. Cette évolution de l'Internet des machines vers l'Internet des objets induit de nouvelles problématiques de recherche reposant sur une révolution des paradigmes de communication traditionnelle de bout en bout et de connectivité permanente. Celles-ci induisent un des nouvelles problématiques comme l'auto-organisation ou l'adressage centré sur le contenu en faisant abstraction de l'entité porteuse de l'information. Dans un tel contexte

post-IP la notion d'adresse est remplacée par celle d'identificateur de donnée et la fonction de routage évolue vers le routage sémantique. De ce fait, l'optimisation et l'évaluation de performances des réseaux nécessite le développement de nouvelles approches, stochastiques ou algorithmiques, comme celles fondées sur la théorie des jeux.

Par ailleurs, les exigences sociétales imposent de prendre en compte de nouvelles métriques des réseaux pour minimiser leur consommation énergétique et maîtriser la puissance rayonnée par les réseaux radio, notamment cellulaires. Dans le domaine des systèmes, on assiste à la convergence entre des recherches sur le parallélisme et le calcul haute performance avec les recherches sur les systèmes distribués et les intergiciels autour de la problématique de la globalisation des ressources informatiques, des infrastructures distribuées à grande échelle et de leur utilisation optimale.

### 3.3 CLOUD COMPUTING

Le cloud computing est un modèle de grille permettant à de multiples utilisateurs l'accès à des ressources matérielles et logicielles via Internet, de manière distribuée et sous forme de services. Comme le coût pour l'utilisateur est calculé en fonction de son usage une gestion fine des ressources est primordiale. Le « cloud » doit supporter l'exécution de différentes classes de services ayant des exigences spécifiques et pouvant évoluer au cours du temps. Ces exigences concernent les aspects temporels, la sécurité, la protection, la tolérance aux fautes, la mobilité, la QoS. Une question d'actualité des systèmes distribués à grande échelle concerne les possibles convergences des systèmes P2P avec le « cloud », en particulier l'utilisation de mécanismes de base, comme les DHT. Il faut faire progresser la recherche sur les moyens d'expressions nouveaux de description des services et mettre en œuvre des stratégies de courtage et d'ordonnement avancées. Il y a besoin d'outils de

description de haut-niveau et de projections automatiques des descriptions vers des architectures effectives.

### 3.4 SÉCURITÉ, RÉSILIENCE ET CRYPTOLOGIE

L'objectif de transparence de l'informatique ubiquitaire ne peut être atteint que si la technologie est suffisamment sûre pour que les utilisateurs puissent s'en affranchir. La résilience, la sécurité, le respect de la vie privée et la sûreté des systèmes sont ici des problématiques transverses d'autant plus critiques que les interactions entre systèmes sont diversifiées et fréquentes. Les outils mis en œuvre proviennent de l'évaluation analytique ou expérimentale, de l'architecture matérielle et logicielle, des protocoles ou encore de l'algorithmique.

Dans les approches architecturales et protocolaires, on distinguera notamment les preuves « zero-knowledge », les protocoles d'établissement et de distribution de clés et autres mécanismes d'appairage, les protocoles de vérification de proximité/de localisation, les mécanismes d'établissement de la confiance (à base ou sans infrastructure de clés publiques), les mécanismes d'évaluation de la coopération ou du comportement. Le respect de la vie privée, qui peut concerner l'anonymat, la localisation (geo-privacy), ou encore des données personnelles, peut lui aussi être abordé par des approches algorithmiques ou cryptographiques, architecturales ou encore touchant aux données elles mêmes.

La cryptologie est un domaine vertical, à la fois proche de la complexité abstraite, de la conception d'algorithmes, de l'implémentation, jusqu'à la carte à puce. La cryptographie traditionnelle n'est pas suffisante pour répondre aux nouveaux défis des échanges sur internet et aux nouveaux scénarios tels que le vote électronique, les enchères en ligne, etc. L'industrialisation d'applications sensibles a déplacé les efforts vers des protocoles où les failles de sécurité proviennent plus souvent de

la mise en œuvre des protocoles que de la solidité de la cryptographie sous-jacente. Les approches heuristiques sont remplacées par une « sécurité prouvée » et les recherches en cryptologie s'attachent à valider les schémas cryptographiques en produisant des preuves de sécurité. Enfin, la sécurité de tout protocole cryptographique reposant sur la difficulté d'un problème algorithmique, la recherche de nouveaux problèmes difficiles constitue toujours un défi important.

## 4 – ROBOTIQUE

La robotique vise à doter des systèmes artificiels de capacités sensorielles, motrices et cognitives. Ces systèmes prolongent l'action de l'humain, ou le remplacent, dans des situations qui peuvent exiger plus ou moins d'autonomie. Un robot perçoit, agit, décide, apprend dans un environnement dynamique complexe, qui peut être partagé avec des êtres humains et/ou d'autres robots. Il doit alors être capable de gérer des interactions physiques et cognitives, ce qui nécessite notamment de détecter et comprendre son vis-à-vis, voire de partager l'autorité de décision ou de mener des actions conjointes. La robotique peut être présentée selon quatre thématiques scientifiques contenant chacune des verrous scientifiques et technologiques.

### 4.1 PERCEPTION, ACTION ET MOUVEMENT

Les capteurs et les actionneurs sont les composants actifs de base du robot. Leur intégration, qui fait appel à la physique des transducteurs, au traitement du signal et de l'image, à l'automatique et à l'algorithmique permet de doter le système de fonctions sensori-motrices. La recherche de nouvelles modalités percep-

tuelles parfois bio-inspirées, s'accompagne de problématiques de fusion de données multi-sensorielles, de modélisation de l'environnement et d'objets. L'intégration de la perception à la commande pose des problèmes variés selon que l'humain est ou n'est pas dans la boucle et selon le type de robot (terrestre à roues ou à pattes, aérien, sous-marin, manipulateur, etc.).

## 4.2 DÉCISION, APPRENTISSAGE

Ces notions désignent les capacités cognitives dont doit être doté un robot pour être autonome. Le robot décide de ses actions sur la base de l'interprétation sémantique de son état et de la variabilité de son environnement. Il raisonne sur ses actions, ce qui nécessite des fonctionnalités avancées de planification, de supervision et contrôle d'exécution en temps réel, ainsi que d'apprentissage supervisé ou automatique. L'intégration de ces fonctionnalités requiert des architectures de contrôle et de décision complexes qui doivent être reconfigurables dynamiquement en satisfaisant de nombreuses contraintes fonctionnelles et opérationnelles.

## 4.3 INTERACTION ET COOPÉRATION

L'interaction homme-robot joue un rôle central dans la robotique de service ou dans le contexte de l'intelligence ambiante. Les problématiques portent sur la détection, l'interprétation, la fusion et la prédiction de signaux de communication (verbale et non verbale, intention, émotion), ainsi que sur la synthèse de ces signaux pour les robots ; sur la coopération et la coordination entre l'humain et le robot ; sur les interfaces homme-robot (nouvelles interfaces cerveau-machine, haptiques). Les travaux sont menés avec des spécialistes des neurosciences et des sciences cognitives, et peuvent

être rapprochés de ceux de la communauté de la réalité virtuelle.

## 4.4 CONCEPTION DES SYSTÈMES ROBOTIQUES

Les méthodes de conception doivent examiner simultanément les aspects structure et commande. Elles peuvent s'inspirer des propriétés du vivant et/ou exploiter des systèmes à base de connaissances ou les techniques avancées d'optimisation pour traiter les topologies particulières de robots à forte complexité structurelle. Elles doivent reposer sur des moyens de simulation physique hautement réalistes permettant de rendre compte d'interactions complexes (tissus mous, impacts, etc.) Il s'agit enfin de développer les constituants technologiques des systèmes robotiques du futur pour qu'ils répondent à des exigences de miniaturisation, de puissance massique, de consommation, d'intégration et de coût (sans oublier l'échelle du micromonde pour lequel de nouveaux paradigmes devront être imaginés).

## 5 – SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LA DÉCISION

Ces dernières années nous assistons à l'émergence de nouvelles problématiques autour du concept de la décision : comme résultat d'interactions collectives, sociales, entre individus et/ou organisations ; comme résultat de processus de décision individuels ; comme résultat d'une élaboration produite par une « machine » dotée d'autonomie décisionnelle. Cette émergence est due à la très grande capacité de calcul aujourd'hui disponible et aux avancées et au rapprochement entre plusieurs axes de recherche comme la Recherche Opérationnelle, l'Intelligence Artifi-

cielle, le Choix Social ou la Théorie du Mesurage.

## 5.1 LES DÉFIS SCIENTIFIQUES

Les défis scientifiques se situent à l'articulation des processus de décision et d'aide à la décision et dans la manipulation des données et de l'information. Il s'agit des méthodes, des modèles, des algorithmes et des langages pour :

- apprendre (des préférences, des désirs, des contraintes, des similarités) de la part des décideurs et des parties prenantes ;

- extraire des connaissances à partir de bases des données (possiblement de très grande taille) et de sources d'informations différentes (contradictoire et/ou de fiabilité variable) ;

- construire des synthèses d'informations (index, indicateurs, représentations visuelles) à la fois signifiantes et utiles ;

- prendre en compte la présence d'informations incertaines, ambiguës, ainsi que des valeurs et des préférences contradictoires et garantir la robustesse à la fois des résultats et des méthodes vis-à-vis des scénarios, des incertitudes structurelles et des jeux de simulation ;

- représenter les connaissances d'origines variées et issues d'interactions différentes (expertises, connaissances du terrain, opinion publique, connaissances méthodologiques) et restituer des règles et des recommandations ;

- permettre la révision et la mise à jour des informations et des valeurs utilisées ainsi que la construction d'explications et des justifications ;

- résoudre des problèmes d'optimisation et/ou de satisfaction de contraintes de grande taille, de structure combinatoire, de nature stochastique et/ou dynamique et garantir la possibilité d'obtenir des « bons résultats » dans des délais raisonnables et, plus généralement, en

présence de moyens de calcul définis et limités ;

- restituer à l'utilisateur final des recommandations compréhensibles, légitimes, explicables, justifiables et satisfaisantes.

## 5.2 LES OUTILS

Ce développement fait appel à des outils informatiques d'origines diverses comme :

- la programmation mathématique, (programmation en nombres entiers, optimisation combinatoire, optimisation multi-objective, programmation stochastique, dynamique, etc.) ;

- la théorie des graphes, la programmation par contraintes, les méta-heuristiques ;

- la complexité algorithmique et la garantie des performances des algorithmes ;

- la modélisation des préférences et leur agrégation en présence de critères multiples ;

- les langages logiques pour la modélisation de l'hésitation, la représentation compacte de l'information, la révision ou la mise à jour ou encore l'argumentation ;

- la théorie du mesurage ;

- la théorie du choix social ;

- les techniques de classification et d'apprentissage (numériques ou symboliques, apprentissage statistique, apprentissage logique, vector support machines, fonctions booléennes) ;

- les techniques d'extraction et de représentation des connaissances ainsi que les modèles de raisonnement ;

- les méthodes de structuration, formulation et re-formulation des problèmes de décision ;

- les nouveaux paradigmes de génie logiciel (systèmes multi-agents, programmation par agents), les plateformes « open-source », l'informatique distribuée, any-time, real-time.

## 5.3 LES APPLICATIONS

Le domaine d'application des Sciences et Technologies de la Décision est très vaste et en pleine expansion. Nous mentionnons ici quelques exemples comme la production, la logistique (commerciale, humanitaire et militaire), le développement durable, la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques, la gestion de la sécurité, les réseaux de distribution (eau, énergie, communications), les services de la santé, les systèmes de recommandation et le commerce électronique, sans oublier l'industrie aéronautique, les transports, la gestion des ressources naturelles, ou encore le web-ranking, la bibliométrie, l'archéologie, la fabrication des puces électroniques et la robotique. Une telle variété d'applications positionne les Sciences et Technologies de la Décision au carrefour des différents champs disciplinaires et nécessite la construction d'un cadre méthodologique nouveau de portée plus générale, ce qui reste le défi scientifique majeur des années à venir.

## 6 – INTERACTIONS

### 6.1 IMAGE ET VISION

Au carrefour de plusieurs disciplines (physique, traitement du signal, intelligence artificielle et cognition, mathématiques continues et discrètes, etc.), le domaine du traitement et de l'interprétation d'images et de la vision par ordinateur se positionne au cœur des STIC. Dans l'optique d'aller de la source à l'interprétation, les évolutions portent sur les capteurs et leur usage, et sur les méthodes et les modèles. Les capteurs évoluent dans deux directions opposées, soit vers une augmentation de la résolution et de la qualité, ou vers un élargissement de bandes spectrales, comme c'est le cas en imagerie aérienne et satellitaire

ou en imagerie médicale, soit au contraire vers des systèmes adaptés à de petits écrans, pour des applications multimédia sur des terminaux de capacités limitées. Les évolutions marquantes s'appuient sur des outils mathématiques, soit dans le domaine continu, soit directement dans le domaine discret.

Les interactions avec l'intelligence artificielle se développent dans diverses directions. Dans le domaine du raisonnement spatial, il s'agit de représenter les entités spatiales visibles dans les images ainsi que leurs relations spatiales, et de raisonner sur ces structures. Les approches symboliques de représentation des connaissances et de raisonnement (ontologies, systèmes à base de connaissances, logiques) sont maintenant associées aux informations, de nature plus numérique, extraites des images pour réaliser des tâches de haut niveau d'interprétation et de description du contenu des images. Les interactions avec l'intelligence artificielle sont également très fortes dans le domaine de l'apprentissage et des théories de l'incertain. Une tendance est d'introduire plus de modélisation, pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes, en intégrant plus de connaissances. Alors que la modélisation était vue essentiellement sous l'angle de la modélisation paramétrique sur la forme ou les probabilités des signaux, les limites de ces approches pour la vision ont nécessité le développement d'autres types de modèles, s'appuyant par exemple sur la géométrie stochastique, la modélisation morphologique et/ou structurelle (graphes, grammaires, relations spatiales...). Inversement, l'analyse et l'interprétation des images conduisent à la construction de modèles (par exemple des modèles anatomiques du corps humain à partir d'images médicales).

Un domaine connexe au traitement des images est celui des informations multimédia. Ce domaine garde une composante forte sur les aspects de compression et de transmission, mais évolue également vers l'interprétation. Pour ce qui concerne le bas niveau, les paradigmes importants sont liés aux représentations parcimonieuses. Une autre évolution importante repose sur l'exploitation de la varia-

bilité et la variété des acquisitions pour dépasser les limites individuelles des capteurs. Le domaine du codage bénéficie des techniques de codage de canal, et du rôle croissant de la théorie de l'information et de la complexité, y compris sous leurs aspects algébriques, pour conduire à des techniques d'optimisation sans paramétrage ni critère. À plus haut niveau, l'interprétation de vidéos et de séquences d'images prend de plus en plus d'ampleur, pour le suivi ou la reconnaissance d'objets, de postures, etc. Mentionnons aussi le domaine de la synthèse d'images, de l'informatique graphique, de la géométrie numérique, de la réalité virtuelle et augmentée, en lien avec les interfaces homme-machine. Les évolutions portent sur les environnements 3D virtuels, combinant signal audio, vision, interfaces, perception, calculs sur processeur graphique (GPU), infographie, etc. Les avatars, les agents conversationnels, avec la prise en compte de plus en plus marquée des aspects émotionnels, en sont des exemples, qui sont amenés à se développer avec l'augmentation des applications de la communication homme – machine, en particulier de la communication non verbale par le geste, les expressions du visage ou les émotions.

Enfin, mentionnons quelques aspects communs aux domaines du signal, de l'image, et de la vision par ordinateur et d'autres parties de l'informatique. Nous avons déjà évoqué les interactions entre signal de parole et langage naturel, ou entre image et Sciences et Technologies de la Décision. L'apprentissage en est un exemple important, avec les applications en fouille de données et indexation. Le traitement de grosses masses de données, qui peuvent être hétérogènes, bénéficie de ces approches, mais aussi d'interactions avec le domaine des bases de données, ou encore des architectures parallèles, de l'algorithmique, des grilles de calculs, et du calcul sur GPU. Citons aussi des liens avec l'automatique et la robotique (en vision robotique, en robotique guidée par l'image, en commande référencée vision), et le domaine des interfaces homme-machine qui évolue pour introduire plus de techniques de vision et les combiner avec d'autres modalités (applications dans le domaine des interfaces homme-cerveau par exemple).

## 6.2 REPRÉSENTER ET APPRENDRE LES CONNAISSANCES

Les connaissances sont (re-)devenues des objets d'étude fondamentaux. L'omniprésence du web sémantique et des ontologies est devenue un vrai moteur pour la recherche. Du côté théorique, il y a des recherches sur les langages de représentation des connaissances (logiques, OWL) et la formalisation du raisonnement (classification, subsomption, satisfiabilité). Les langages de représentation s'appuient essentiellement sur logiques de descriptions avec des variations qui permettent de prendre en compte des phénomènes naturels plus ou moins subtils ; des langages de représentation à base de graphes commencent à faire leur apparition. Les tendances actuelles et futures sont liées à la nécessité de construire et de disposer d'ontologies qui sont devenues des objets d'études à part entière avec des opérations propres comme l'alignement, la mise en réseau et le raisonnement distribué, la conception par composition, modulaire, par réutilisation, etc. En parallèle, d'autres problématiques montrent des liens tangibles avec le web sémantique tout en ayant des développements propres : services web, wikis et travail collaboratif, wikis sémantiques, qui ont donné parmi les plus grandes ressources de connaissances existantes (Wikipedia et autres réseaux sociaux).

La conception d'ontologies est au centre des préoccupations actuelles et futures de nos disciplines, en liaison directe avec les méthodes d'apprentissage et de fouille de données. Ainsi, les méthodes de fouille de textes, d'annotation et de recherche sémantique, vont prendre de l'importance et être capable d'appréhender les très grands volumes de documents disponibles. Ce développement donne aussi une impulsion considérable aux méthodes d'apprentissage elles-mêmes, où les préoccupations premières sont le passage à l'échelle, l'hybridation, l'applicabilité et l'intégration naturelle dans tout système à base de connaissances. Connaissances, raisonnement et apprentissage se rejoignent. L'hybridation des méthodes d'apprentissage

symboliques et numériques va connaître des développements originaux après l'effervescence des dernières années sur les méthodes numériques. Enfin, la notion de systèmes à base de connaissances ne prendra tout son sens que si ces systèmes sont capables d'apprendre comme ils commencent à être capables de raisonner.

### 6.3 TRAITEMENT DES LANGUES ÉCRITES, PARLÉES ET SIGNÉES (TEPS)

En préambule, il faut souligner que cette vaste thématique de recherche, par essence pluridisciplinaire, possède de nombreux liens avec d'autres thèmes de la section 07 mais aussi avec d'autres sections du comité national (09, 27, 34). Le spectre des disciplines concernées est large et transversal : il s'étend de l'acoustique, du traitement du signal et de la modélisation statistique jusqu'à l'IA, l'algorithmique, l'apprentissage, le traitement automatique des langues, en passant par la perception, la cognition, la psychoacoustique, la linguistique, les neurosciences, etc. En outre, dans le domaine des TEPS, les méthodologies de traitement de corpus occupent une place de première importance.

Le TEPS repose sur la combinaison de plusieurs problématiques scientifiques, ce qui nécessite de construire des modèles symboliques et/ou stochastiques rendant compte des différentes facettes des systèmes de communication linguistique et de leur inter-relations, qu'il s'agisse de modèles acoustico-phonétiques, de représentations lexicales, de modèles syntaxiques, de grammaires, d'ontologies, mais aussi de modèles gestuels, perceptifs et d'acquisition du langage.

De nombreux facteurs de variabilité viennent interférer avec les processus linguistiques (variabilité individuelle, environnementale, situationnelle, sociale, liée au média...). Il s'y

ajoute l'évolution naturelle des langues et des conventions d'écritures (par ex. les SMS). De tous ces facteurs, il résulte une grande complexité de la modélisation des niveaux de représentation et de leurs dépendances, et le domaine de l'algorithmique est ici crucial pour répondre aux problèmes d'apprentissage (observations incomplètes, exploitation de connaissances a priori, apprentissage discriminant) et d'optimisation des tâches de décodage (reconnaissance, transcription) et de transduction (traduction, compréhension).

À l'origine des progrès majeurs accomplis en reconnaissance de la parole dans les dernières décennies, le recours aux méthodes statistiques s'est largement répandu dans l'ensemble du domaine du TEPS, y compris pour répondre à des problèmes aussi complexes que la traduction. Parmi les sujets de recherche d'actualité, on peut citer les méthodes d'apprentissage peu ou non supervisées, l'adaptation automatique des modèles au contexte d'utilisation, la modélisation et le traitement des langues peu dotées, la caractérisation du locuteur et de ses émotions, la modélisation multi-modale, l'ensemble visant notamment à améliorer l'exploitabilité des contenus (indexation, ré-éditorialisation, distribution intelligente) et la qualité d'interaction (personnalisation, communication parlée augmentée, agents conversationnels animés,...).

Du point de vue pratique, une part importante des débouchés se rencontre dans les domaines où les usagers d'une ou plusieurs langues sont confrontés à des difficultés de communication lors d'interactions avec des machines ou avec d'autres humains, que les TEPS peuvent alors aider à résoudre ou du moins à *médier*. La gamme des applications est très large : transcription écrite de parole, traduction automatique, localisation de logiciels, correction orthographique, recherche d'information, résumé automatique, systèmes conversationnels, aide aux handicapés, synthèse de parole et de gestes, fouille et organisation de données sonores, etc.

Plus généralement, le TEPS s'inscrit au cœur des activités humaines de masse, qu'elles soient économiques, politiques, culturelles,

professionnelles ou personnelles. Ainsi, par exemple, la traduction automatique fournit des éléments de réponse aux défis posés par le multilinguisme (notamment à l'échelle de l'Union Européenne) l'intensification du web, du e-commerce, des réseaux sociaux et la mondialisation des échanges. Dans ce contexte, l'accès aux connaissances présentes dans des contenus audio, textuels ou multimédia dépend étroitement (et stratégiquement) de la qualité des technologies de la langue écrite, parlée et signée. D'autres domaines de première importance, comme la veille en intelligence économique et la préservation du patrimoine culturel dans sa diversité linguistique sont également concernés. En résumé, les besoins technologiques nouveaux pour transcrire, analyser, comprendre, structurer, traduire, sont loin d'être satisfaits. Le domaine des TEPS apparaît donc comme porteur de développements industriels importants en réponse à une forte demande sociétale.

## 6.4 CONCEPTION ET TEST DE CIRCUITS ET SYSTÈMES INTÉGRÉS

À l'heure des nanotechnologies, le degré de miniaturisation a atteint des densités d'intégration vertigineuses avec des circuits pouvant contenir des milliards de transistors. À ce stade, le circuit devient « système ». Cette course à l'intégration sur silicium ne s'arrête pas aux composants électroniques, de par le degré de complexité atteint. L'approche système devient inéluctable, les problématiques à caractère algorithmique, informatique ou mathématique sont au cœur des compétences à déployer. L'augmentation des performances est devenue une logique d'évolution naturelle. Avec l'accroissement de la complexité des systèmes les problématiques de spécification, modélisation, réutilisation, optimisation de performances, tolérance aux défauts, vérification, test après fabrication, sont autant de défis à relever pour accompagner cette course à l'intégration. Les défis liés à la conception de ces systèmes relèvent pour une grande part de la section 8,

mais une partie tout aussi importante relève de la section 7. Et le maître mot ici est « système complexe ». Concevoir un tel système suppose de définir des méthodologies nouvelles pour mener à bien la conception à tous les niveaux. La conception de ces systèmes complexes est par ailleurs soumise à des contraintes industrielles et économiques, on parle alors de productivité de la conception, notion qui est liée au degré de réutilisation possible à travers des bibliothèques de fonctions pouvant aller de la fonction la plus élémentaire jusqu'aux blocs virtuels les plus récents qui correspondent à un microprocesseur complet avec ses interfaces.

L'architecture matérielle de ces systèmes a beaucoup évolué. On conçoit aujourd'hui des circuits 'multi-cœurs' composés de 2, 4, 16 cœurs de processeurs sur un même substrat de silicium et il est envisagé de passer à l'échelle du 'manycore' : un système intégré composé de plus de 1000 cœurs de processeurs. Les communications intra-circuit ont dépassé le concept de fil à fil pour des 'Network-On-Chip' dans lesquels les blocs intégrés communiquent dans la puce à la manière des réseaux. C'est en fait la partie de circuit dédiée aux mémoires qui augmente le plus rapidement en proportion des autres fonctions intégrées, révolutionnant ainsi l'interface logiciel-matériel. Cette coexistence du logiciel et du matériel est telle que pratiquement toute macro-fonction complexe peut être intégrée sous forme de matériel ou sous forme de logiciel. Il en résulte que toute conception de circuit est confrontée au problème de la « co-conception » : du partage optimal des fonctions entre logiciel et matériel. Ce constat démontre qu'il est nécessaire de poursuivre des études de manière à fournir aux concepteurs des méthodes et des modèles efficaces permettant de créer de manière sûre des systèmes hautement complexes. On distingue quatre facteurs fondamentaux qui sont à la base des recherches à poursuivre dans ce domaine :

- L'augmentation de la complexité. Les technologies CMOS utilisées pour bâtir les systèmes intégrés évoluent vers des systèmes intégrant toujours plus de composants.

– L'augmentation des performances. C'est une évolution naturelle des objets technologiques de progresser vers toujours plus de fonctionnalité, plus de vitesse, plus d'autonomie, plus de mobilité, plus de flexibilité, plus de sécurité.

– L'augmentation de l'hétérogénéité. L'intégration est un objectif constant car elle favorise l'augmentation de la vitesse et la diminution de la consommation, mais aussi l'amélioration de la fiabilité. C'est maintenant le tour des capteurs sous forme de MEMS qui cohabitent avec l'électronique de traitement sur un substrat unique de silicium.

– La fin de l'hypothèse fondatrice. La compétence du concepteur pouvait se définir jusqu'à aujourd'hui comme l'art de créer des fonctions systèmes hautement complexes par interconnexion de composants supposés parfaitement fonctionnels. Aujourd'hui, la course à la réduction des dimensions atteint ses limites et les technologies poussées dans leurs retranchements proposent de continuer à intégrer toujours plus de transistors mais en acceptant des transistors non garantis.

## 6.5 SYSTÈMES EMBARQUÉS

Un système embarqué est un système qui interagit avec son environnement de manière autonome et qui doit être conçu et réalisé avec de très fortes contraintes : celles liées à la criticité et la taille du système, sa consommation, son prix, la qualité de services (temps de réponse, continuité, tolérance aux pannes, etc.), la réactivité en termes de conception et d'évolution, et enfin la déployabilité sur des architectures avec des systèmes d'exploitation spécifiques et/ou multiples. La recherche et les activités de R&D dans le domaine des processeurs d'ordinateurs sont totalement dominées par les industriels américains. Les systèmes embarqués constituent un espace d'innovation où des groupes de recherche européens peuvent suivre leurs idées jusqu'à leur finalisation en R&D en collaboration avec l'industrie,

comme c'est le cas avec le foisonnement de recherches autour du processeur ARM.

# 7 – INTERDISCIPLINARITÉ

## 7.1 SYSTÈMES D'INFORMATION

Si Internet et le web furent les déclencheurs majeurs de la globalisation de l'information par la multiplication de ses sources et de ses usages, les sciences (de la physique aux sciences de la terre en passant par la biologie sans oublier les sciences humaines) se révèlent être des domaines fortement consommateurs et producteurs d'information, qu'ils ont donc aussi besoin de traiter. Les caractéristiques transversales sont multiples : grandes masses de données et/ou de connaissances, hétérogénéité, mobilité, qualité, adaptabilité au contexte. L'information est disponible aujourd'hui à partir de nombreuses sources autonomes et hétérogènes. L'hétérogénéité de l'information se décline à tous les niveaux d'abstraction et selon divers aspects dont la combinaison est un des facteurs de complexité : hétérogénéité sémantique, de types, de formats, des représentations. L'information/les données évoluent de manière fréquente, parfois de manière permanente et intensive. La restitution de cette évolution et la qualité de l'information sont dépendantes, entre autres, du choix de granularité temporelle ainsi que de la localisation des sources. L'explosion de l'usage de capteurs produisant des données sous forme de signaux génère elle aussi de nombreux problèmes d'acquisition et de traitement et a donné naissance aux systèmes de gestion de flots de données.

La gestion des données suit deux approches complémentaires, l'une liée aux grands volumes de données, l'autre au grand nombre de sources. Aujourd'hui la première approche est dominée par le cloud computing, des besoins en matière de répllication de données avec cohérence faible et l'apparition de

systèmes de gestion de données généraux et passant à l'échelle comme BigTable. La deuxième approche utilise plutôt le paradigme P2P pour fédérer dynamiquement un grand nombre de sources, ce qui nécessite d'étendre les travaux sur les médiateurs. Ces approches sont à replacer au cœur des systèmes d'information qui ont pour objet la gestion de l'information tout au long d'une chaîne complexe : capture, saisie, stockage, production, structuration, ainsi qu'extraction, intégration, analyse, et visualisation des données. Les outils d'accès aux données doivent faire coopérer de nombreuses méthodes issues des bases de données, de la recherche d'information, de l'intelligence artificielle. Sur ce dernier aspect il convient en effet de proposer de nouveaux paradigmes qui autorisent la visualisation de données massives par l'utilisateur. Un autre aspect concerne le respect de la confidentialité des données et la sécurité des accès. Si l'on se situe moins au niveau opérationnel des systèmes d'information il est important de considérer la formalisation et la conception des systèmes dans leur dimension ubiquitaire et grande échelle. Il s'agit de proposer des méta-modèles orientés processus métier, des modèles, des langages, des outils pour appuyer des raisonnements à différents niveaux d'abstraction. Les travaux en bases de données et recherche d'information doivent intensifier l'intégration des approches pour développer les technologies permettant de rendre transparent la complexité des procédés d'analyse, d'intégration, d'extraction, d'accès aux informations, tout autant que le volume, la nature et la localisation des données accédées et ceci pour des usages allant de l'ingénierie industrielle à l'usage personnel.

## 7.2 ÉTHIQUE, DÉONTOLOGIE, SOCIÉTÉ

Les Sciences et technologies de l'information ont connu un développement spectaculaire, créant un nouveau monde immatériel, modifiant les relations entre les humains et

leur environnement, investissant toutes les strates de la société. Des problèmes éthiques majeurs sont apparus : la cybersurveillance et la collecte de données sont susceptibles de porter atteinte au droit à la vie privée ; la diffusion d'œuvres sur internet peut contrarier le droit d'auteur ; le vote électronique institue des élections non transparentes ; l'autonomie croissante des robots soulève des questions nouvelles de responsabilité et de partage d'autorité, etc. Il est maintenant nécessaire de travailler sur l'éthique des STIC en mettant en perspectives nos sciences avec différentes disciplines des sciences humaines et sociales : philosophie, sociologie, épistémologie, mais aussi sciences juridiques et politiques. Il est nécessaire de créer des outils méthodologiques et d'élaborer des formations de haut niveau, afin que les chercheurs soient en mesure d'appréhender cette nouvelle dimension sociétale dans la pratique de leur métier, de prévoir les conséquences potentielles des recherches, et ainsi de les orienter vers de nouvelles directions. Des recherches en éthique des STIC sont déjà menées dans les pays nordiques ou anglo-saxons et ont permis l'émergence de vecteurs de diffusion des travaux de recherche. Il s'agit de prendre place dans ce nouveau champ disciplinaire trop longtemps négligé, dans lequel nous avons des compétences spécifiques en France et en particulier au CNRS.

## 7.3 BIO-INFORMATIQUE

L'informatique doit fournir, avec les autres disciplines mères de la bioinformatique, les concepts nouveaux pour modéliser les processus biologiques afin de les comprendre, de les prédire, de les simuler, dans le but d'aider à répondre aux questions de la biologie fondamentale et de ses applications. Les progrès fulgurants des techniques d'acquisition permettent d'accéder à des données biologiques de plus en plus massives et de plus en plus diverses. Par ailleurs, les bases de données biologiques contiennent une immense masse de connaissances à exploiter, mais qui sont hau-

tement hétérogènes, changeantes, parfois peu fiables voire contradictoires. Le rapport de conjoncture de la CID 43 détaille les principaux axes de recherches fondamentales en informatique qui sont nécessaires pour répondre aux défis de l'analyse des données et de la modélisation en biologie. Nous en présentons ici une synthèse.

L'algorithmique est et restera un domaine de recherche essentiel pour la bioinformatique. Les problèmes algorithmiques posés par la biologie sont, dans l'immense majorité des cas, NP-difficiles dès lors que la modélisation tient compte de tous les paramètres «réalistes» connus. Une étude fine de ces problèmes est nécessaire pour aboutir à des approches de résolution effectives. Celles-ci peuvent être fondées notamment sur des simplifications biologiquement réalistes des modèles, sur des algorithmes d'approximation, sur des approches de complexité paramétrée, ou encore sur des heuristiques bien fondées. Les problèmes théoriquement plus faciles motivent également des recherches poussées pour passer à l'échelle (parallélisme massif, programmation sur circuits programmables (FPGA) ou cartes graphiques (GPU), structures d'indexation sophistiquées).

La classification et l'apprentissage automatiques constituent un autre domaine clé pour la bioinformatique. Ce domaine est en lien avec la statistique et la modélisation probabiliste, et avec la théorie des langages (grammaires stochastiques). Il y a pléthore de données, ce qui est un avantage ; mais aussi pléthore de paramètres, et souvent peu de données avérées expérimentalement sur lesquelles les méthodes d'apprentissage peuvent se fonder. Le développement de méthodes pour enchaîner les étapes d'analyse à grande échelle des processus biologiques nécessite de continuer à développer des recherches dans d'autres domaines clés tels que la manipulation et l'intégration de données massives, complexes et hétérogènes, le calcul distribué et massif, l'analyse d'images et la géométrie computationnelle, la modélisation formelle de systèmes dynamiques, la visualisation. Finalement, une particularité de la recherche en

informatique pour la biologie est qu'elle nécessite une réelle intrication de tous les domaines de la discipline, allant des plus théoriques, touchant les mathématiques, jusqu'aux domaines les plus proches du « hardware », en passant par la gestion des données ou l'algorithmique.

## 7.4 DÉVELOPPEMENT DURABLE

Une profonde réflexion doit être menée sur l'impact environnemental des technologies de l'information et de la communication. Aujourd'hui, cette industrie est responsable de 2% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, les seuls centres de données consomment 2 à 3% de l'électricité mondiale. Les nouveaux modes de connexion des usagers aux réseaux, permanente, mobile et à haut débit, ainsi que l'accroissement quantitatif et qualitatif des contenus échangés et stockés provoquera le doublement de l'impact énergétique de ces technologies dans la prochaine décennie. Des enjeux scientifiques profonds sont au cœur de la mutation technologique qui devient nécessaire, à savoir concevoir des systèmes matériels, protocolaires, et applicatifs optimisant efficacité énergétique et performances de service. De nombreux domaines applicatifs sont concernés, des circuits aux systèmes distribués pair à pair en passant par les terminaux fixes ou mobiles, les réseaux de communication et de capteurs sont également concernés, notamment dans les bâtiments intelligents. Cet horizon technologique ne sera atteint qu'avec des ruptures scientifiques dans des domaines variés, et grâce à des interactions entre ces domaines : algorithmique, protocoles, optimisation combinatoire, modélisation stochastique, micro-électronique, masses de données, commande, diagnostic, etc.

D'autre part, la conception et la mise en œuvre des politiques de développement durable interpelle l'informatique sur plusieurs sujets de recherche : les méthodes d'aide à la décision et la construction d'indicateurs significatifs pour la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques ; le traite-

ment d'énormes masses de données (changement climatique, qualité de l'air, des eaux et des sols), assez souvent sous forme de flot d'information continue, qui demande la mise en place d'algorithmes spécifiques de simulation et d'optimisation ainsi que l'étude de leurs performances ; le développement de méthodes d'optimisation spécifiques dans plusieurs domaines d'activité économique comme la production et distribution d'énergie, la gestion de l'eau, l'exploitation des ressources naturelles, la logistique, la planification de l'utilisation des sols.

## 8 – ANALYSE

### 8.1 FORCES

Les sciences de l'information ont une longue et forte tradition en France et constituent une discipline bien établie à la fois dans le monde académique et dans le monde industriel. La recherche menée couvre tous les aspects depuis la recherche fondamentale dans les domaines clés de l'informatique théorique, du traitement du signal et des images, de l'automatique, et de la logique, jusqu'à la recherche à l'interface avec le monde réel et en interaction avec d'autres disciplines. La communauté des chercheurs (essentiellement au sein de laboratoires universitaires) est forte et attractive pour des chercheurs de haut niveau du monde entier (les postes ouverts par le CNRS et l'INRIA y contribuent largement). La communauté est largement structurée dans les GDR suivantes (par ailleurs plusieurs parmi ces GDR ont contribué activement à ce rapport) avec un impact très positif : GDR 673 Informatique Mathématique,

GDR 717 Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques, GDR 720 Information, Signal, Images, Vision, GDR 722 Information, Interaction, Intelligence, GDR 725 Architecture, Systèmes, Réseaux, GDR

2340 Méthodes et Applications pour la Géomatique et l'Information Spatiale, GDR 2286 Mathématiques des Systèmes Perceptifs et Cognitifs, GDR 2647 STIC et Santé, GDR 2995 System On Chip – System In Package, GDR 3000 Informatique Graphique, GDR 3002 Recherche Opérationnelle, GDR 3003 Bioinformatique moléculaire, GDR 3072 Robotique, GDR 3045 Vision, GDR 3168 Génie de Programmation et du Logiciel.

### 8.2 FAIBLESSES

La fragmentation trop importante des laboratoires de recherche, sans stratégie associée suffisamment claire, peut être vue comme un point faible. Ce morcellement est manifeste pour les grandes institutions que sont le CNRS et l'INRIA, dont la complémentarité des missions pourrait être mieux appréhendée. Il en résulte des politiques scientifiques et de gestion de ressources insuffisamment coordonnées. Une confusion historique regrettable entre recherche en sciences de l'information et ingénierie informatique a déséquilibré notre communauté. En particuliers nos chercheurs sont surchargés de tâches qui ne devraient pas leur être dévolues, et si la ration IAT/chercheur, déjà faible au CNRS était appliqué dans les universités, notre travail serait bien plus efficace et aurait bien plus d'impact. Bien que la communauté française soit forte et structurée, elle manque encore d'ouverture européenne et internationale dans certains domaines. Les équipes Françaises sont présentes dans les projets européens mais elles pourraient l'être davantage compte tenu du potentiel existant. Cela devient crucial au moment où plusieurs pays non européens développent leur potentiel de recherche en sciences de l'information, et sont susceptibles de devenir, à moyen terme, plus attractifs que chaque pays pris individuellement en Europe.

### **8.3 RISQUES**

La recherche fondamentale souffre d'un manque de moyens pérennes depuis plusieurs années. D'autre part, l'attractivité des études supérieures en sciences de l'information et des carrières de recherche stagne et pourrait même décroître à moyen terme. Cette tendance néfaste ne peut pas être compensée par le drainage de cerveaux venant d'ailleurs, puisque de plus en plus de pays atteignent ou vont atteindre un niveau d'enseignement supérieur et de recherche comparable à celui de la France et de l'Europe. La priorité «STIC» qu'affichent les gouvernements successifs depuis plusieurs années pourrait être transformée en un simple effet d'annonce si on n'impulse pas de politique nationale musclée et incitative dans le domaine : nos disciplines sont couvertes de façon importante par de nombreuses universités françaises prestigieuses, mais elles ne sont que très rarement des priorités des établissements.

### **8.4 OPPORTUNITÉS**

La demande en sciences de l'information ne cesse de croître dans le monde entier. Les offres de postes au niveau international, à la fois dans les centres de recherche publics et privés ou directement dans l'industrie (des services) augmentent également. L'innovation industrielle dépend déjà fortement des avancées en informatique. Les technologies de l'information et de la communication vont vraisemblablement être cruciales pour contrôler le développement économique, et la société de l'information deviendra un enjeu majeur dans une perspective de globalisation dans la mesure où de plus en plus de pays y auront accès. Le développement durable, associé aux considérations éthiques, représente pour nous un enjeu considérable.



# 08

---

## **MICRO ET NANO-TECHNOLOGIES, ÉLECTRONIQUE, PHOTONIQUE, ÉLECTROMAGNÉTISME, ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

### *Président*

Laurent NICOLAS

### *Membres de la section*

Joël ANDRIEU

Jean-Pascal CAMBRONNE

Gilles DAMBRINE

Jacques DAVOINE

Élisabeth DUFOUR-GERGAM

Guy HOLLINGER

Vincent LAUDE

Daniel MATHIOT

Serge MONNERET

Liviu NICU

Claude PELLET

Jean-Claude POMMIER

Laurent RANNO

Isabelle SAGNES

Patrice SALZENSTEIN

Jean-Louis SANCHEZ

Ronan SAULEAU

Marie-Noëlle SEMERIA

Laurent VIVIEN

Les recherches développées dans la section 08 portent sur les matériaux fonctionnels, ainsi que sur la conception, la fabrication et la caractérisation des composants et des systèmes dans les domaines de l'électronique, de la photonique, de l'électromagnétisme et de l'énergie électrique. La mise en œuvre d'une approche systémique globale, depuis le matériau et sa mise en forme jusqu'à la conception et le développement des systèmes (de puissance, micro- ou nano-), intégrant dès leur conception les spécificités des composants et les architectures nouvelles qui leur sont associées, est également une des spécificités des laboratoires ou équipes rattachées à la section 08. D'une manière générale, l'approche développée relève d'une approche générale d'ingénierie : il s'agit de « comprendre les phénomènes physiques et de les modéliser afin de concevoir des systèmes par nature complexes ». Les recherches menées au sein de la section s'insèrent donc parfaitement dans l'Institut INSIS, et s'appuient sur des recherches à caractère plus fondamental menées par les laboratoires de l'Institut INP (en particulier sections 04 et 06 du Comité National) ainsi que des laboratoires des Instituts INC et INSB. Certains sujets, tels que les systèmes embarqués, les objets communicants, le couplage entre information et mesure physique, la conception de robots et plus généralement toutes les inter-

actions entre logiciel et matériel, sont à l'interface avec l'Institut INS2I.

Ce rapport est structuré en six parties : quatre d'entre elles correspondent aux 4 domaines thématiques couverts par la section (électronique, photonique, électromagnétisme et génie électrique), les deux autres ayant trait aux deux domaines transversaux de la section que sont les nanotechnologies et les micro- et nanosystèmes.

## 1 – NANOTECHNOLOGIES

Combinées aux nanosciences dont l'objectif est de comprendre les propriétés de la matière structurée à petite échelle, les nanotechnologies visent à élaborer de nouveaux matériaux, dispositifs et systèmes toujours plus petits et performants, en bénéficiant des avantages de propriétés nouvelles (physiques, chimiques ou biologiques) liées à la réduction des dimensions des objets ou dispositifs.

La fabrication des dispositifs nanotechnologiques peut se faire par deux approches complémentaires :

- La première est la voie descendante (« top down ») qui consiste par lithographie, gravure et dépôts, à structurer et connecter des nano-objets. Elle est mise en œuvre depuis plusieurs décennies par la microélectronique silicium (loi de Moore) et a conduit à la révolution technologique de l'industrie informatique et d'internet.

- La seconde correspond à la voie ascendante (« bottom-up ») qui consiste à manipuler et à assembler des objets atome par atome ou molécule par molécule pour les intégrer ensuite dans des systèmes plus grands aux fonctionnalités nouvelles. Elle est encore en devenir mais pourrait conduire dans le futur à des révolutions, notamment dans les domaines de la santé et de l'environnement.

En toute rigueur, les nanotechnologies ne devraient correspondre qu'à la réalisation

et à la manipulation d'objets ou composants de dimensions nanométriques. Cependant, par extension, on parle de nanotechnologies lorsqu'au moins une des trois dimensions de l'objet ou du composant est de dimensions comprises entre 1 et 100 nm. Les « nanos » couvrent donc globalement le domaine de ce qu'on appelait encore récemment les « micro-nanotechnologies ».

Les principaux champs scientifiques et technologiques sont la microélectronique (systèmes sur puce, nanoélectronique, électronique de spin...), la photonique (nanosources de lumière, circuits intégrés photoniques, microsystèmes optiques), les nanomatériaux (nanoparticules, boîtes quantiques et nanofils, surfaces nanostructurées...), la chimie (édifices supramoléculaires, biomimétisme...) et la biologie.

Dans tous ces domaines, les défis sont nombreux. Il faut d'abord élaborer, observer et caractériser des objets nanométriques, puis assembler différents types d'objets et de dispositifs de tailles nanométriques pour construire de véritables nanosystèmes. Le développement des nanotechnologies doit prendre en compte de nombreux facteurs tels que l'existence d'outils de conception, la fabrication à grande échelle et donc à bas coût, la compatibilité avec les technologies existantes, mais également les impacts sociétaux et environnementaux.

### 1.1 PHÉNOMÈNES SPÉCIFIQUES À L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE

Les véritables ruptures technologiques relèveront de principes de fonctionnement résolument nouveaux exploitant les effets physiques propres aux dimensions nanométriques. Les sciences de l'infiniment petit sont par essence pluridisciplinaires. Il faut donc favoriser et amplifier les recherches croisées permettant de progresser dans les connaissances de base sur les nouvelles propriétés apparaissant à l'échelle nanométrique

et clarifier les principes scientifiques et techniques régissant les propriétés des structures, des procédés et des mécanismes aux dimensions nanométriques. Il s'agit donc aussi de favoriser le développement d'outils spécifiques qui permettent la conception, la fabrication et la caractérisation des nanoobjets. À cette fin, les différentes techniques de microscopie à champ proche restent des outils de laboratoire simples et efficaces.

## 1.2 NANOMATÉRIAUX

La structuration de la matière dans le but de modifier ses propriétés physiques est ancienne mais les nanotechnologies permettent l'ouverture d'un champ de recherche immense avec les possibilités de structurations en une, deux et même trois dimensions afin de créer des assemblages de plans, de fils ou de boîtes nanométriques. Cette nanostructuration multidimensionnelle permet d'envisager de très nombreuses applications en électronique (puits, fils et boîtes quantiques), en optique (modification des indices de réfraction, des couleurs, etc.), dans le photovoltaïque (cellules de 3<sup>e</sup> génération) et dans bien d'autres domaines. Il faut donc favoriser les recherches sur les nouveaux matériaux à l'échelle nanométrique, sur le contrôle et la maîtrise de leurs propriétés, en tenant compte non seulement des effets de dimension mais aussi des interfaces. Ces travaux viseront au développement de la modélisation et de la synthèse contrôlée de matériaux nanostructurés aux propriétés bien définies.

Outre la poursuite des recherches sur les semiconducteurs traditionnels, il est recommandé d'explorer les potentialités de nouveaux matériaux (nanotubes de carbone, graphène, ferroélectriques, piézoélectriques, ferromagnétiques, matériaux à changement de phase, composés moléculaires...) et leur intégration hétérogène sur des plateformes (notamment silicium) multi-matériaux.

## 1.3 LES PROCÉDÉS DE NANOFABRICATION

Les techniques de lithographie utilisant des particules accélérées (électrons ou ions) se révèlent très performantes du point de vue de la résolution mais souffrent de leur inaptitude à la fabrication collective en masse. La fabrication collective de nano-objets est toutefois possible par utilisation de la nano-impresion, qui présente l'avantage de dupliquer à faible coût des motifs de quelques nanomètres sur de grandes surfaces, ou par lithographie X, technique nécessitant une instrumentation complexe (EUV : Extreme UV lithography).

À l'échelle du nanomètre, de nombreuses méthodes de fabrication doivent être revisitées. Il est donc primordial de soutenir l'ensemble des travaux de recherche et développement permettant l'émergence de nanomatériaux, nanostructures, nanodispositifs et nanosystèmes fiables, fabricables à grande échelle et donc à bas coût. Seront privilégiées les techniques mixtes associant des approches descendante (top-down) ultra miniaturisée et ascendante (bottom-up). Notons que la fabrication par auto-assemblage ou auto-organisation n'en est qu'à ses débuts et les recherches dans ce domaine pluridisciplinaire doivent être développées. Les architectures associées à ces nano-objets devront tenir compte des dispersions en taille inhérente à ces nouvelles approches.

## 1.4 INSTRUMENTATION ET MÉTROLOGIE POUR LES NANOTECHNOLOGIES

Le développement et l'utilisation à grande échelle des nanotechnologies nécessitent l'utilisation d'une instrumentation et d'une métrologie adaptées. Pour permettre les développements industriels, il faut mettre au point des instruments et des méthodologies garantis-

sant une qualité et une reproductibilité constantes. Il est donc impératif de soutenir les recherches concernant le développement d'une nouvelle génération de moyens de modélisation, de synthèse et caractérisation de matériaux et aussi de fabrication de dispositifs et systèmes.

L'augmentation de la densité d'intégration nécessite un accroissement de la vitesse de fonctionnement des composants sur lequel un développement instrumental doit également être entrepris. Ces instruments au sens large concernent non seulement les laboratoires mais également l'industrie ; les possibilités d'automatisation, et les aspects de normalisation doivent aussi être développés.

## **1.5 CONSTRUIRE DE VÉRITABLES COMPOSANTS ET SYSTÈMES À L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE**

En utilisant les résultats des travaux fondamentaux et des nouveaux principes issus des nanosciences, il faut favoriser la conception, la fabrication et la caractérisation de nouveaux composants et systèmes pour créer de nouvelles fonctionnalités. Les systèmes et les dispositifs eux-mêmes ne seront pas limités à ces dimensions nanométriques et doivent pouvoir être intégrés dans un monde macroscopique. Ainsi de nouvelles architectures devront être conçues prenant en compte les spécificités et les nouvelles fonctionnalités de ces nanocomposants et nanoobjets.

Dans la majorité des applications, le passage nano-objet individuel à système de nano-objets (nano systèmes) est complexe et ce passage nécessite souvent une technique mixte associant approche descendante et approche ascendante. Cette démarche se heurte à plusieurs difficultés comme le manque de méthodes et d'outils de conception, en particulier lorsque les systèmes associent des éléments organiques, inorganiques voire biologiques. La dimension « système »

des nanotechnologies est un passage obligé pour un transfert efficace du laboratoire vers l'industrie. Elle n'est encore que peu abordée dans les laboratoires académiques alors que les retombées potentielles sont considérables. Il est donc important de soutenir les recherches sur les techniques de conception des nano-systèmes.

## **1.6 STRATÉGIE DE RECHERCHE : PROGRAMMES ET ÉQUIPEMENTS**

Quels que soient les domaines applicatifs visés, les travaux de recherche en nanotechnologie demandent des moyens expérimentaux lourds et des communautés de chercheurs pluridisciplinaires. Le CNRS doit donc encourager le développement de projets interdisciplinaires et la mise en réseaux des plates-formes technologiques permettant le développement de ces projets.

Parmi les domaines à favoriser, citons :

- les outils unifiés pour la modélisation, la simulation et la conception de nano systèmes ;
- les outils pour la nanofabrication incluant les problématiques industrielles telles que la reproductibilité, le contrôle des procédés et les possibilités de co-intégration avec les technologies existantes ;
- le transfert vers l'industrie des travaux des laboratoires en supportant la création de groupes de recherches pluridisciplinaires associant des chercheurs et universitaires mais également des personnels de la R&D industrielle.

Devant l'importance des défis à relever, il est important de maintenir et d'améliorer la compétitivité des moyens mis à la disposition des chercheurs. Il faut à la fois favoriser la localisation d'équipements spécialisés dans les meilleurs laboratoires du domaine et le développement des plates-formes qui sont à la disposition de la communauté nationale. La France a mis en place un réseau de Grandes Centrales de Technologies possédant des

moyens lourds pour l'élaboration et l'intégration de nanodispositifs ainsi qu'un réseau de centrales spécifiques de proximité, plus orientées nanosciences, ayant des équipements plus légers souvent spécifiques. Toutes ces Centrales sont rattachées à des laboratoires de recherche en nanosciences et nanotechnologies et leurs chercheurs participent activement aux recherches en technologie. Un développement cohérent du parc instrumental et une meilleure synergie entre les différents types de centrale sont nécessaires.

## 1.7 LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX

Les enjeux économiques des nanotechnologies sont importants. La microélectronique silicium tire depuis quarante ans l'industrie des semi-conducteurs. Cette tendance devrait se poursuivre. Cependant on assiste aujourd'hui à une convergence des technologies : l'électronique, l'optique, la chimie, la biologie sont combinées. Les « puces électroniques », les microsystèmes et les microcapteurs se diversifient avec l'ajout de plus en plus de nouvelles fonctions. Les applications potentielles sont immenses et permettront des mutations ou des avancées dans les grands secteurs économiques : l'industrie des Semiconducteurs et de la Microélectronique, les Télécommunications, l'Énergie, la Santé, la Biologie, le Contrôle industriel, les Transports, la Défense, l'Environnement, etc.

Ces développements ne sont pas sans poser de nombreux problèmes éthiques et sociétaux. Les nanotechnologies, comme toute nouvelle technologie émergente, peuvent présenter des risques mais aussi apporter des progrès importants, notamment en termes d'économie d'énergie ou de progrès médical. Pour une bonne acceptation sociale, les nombreuses applications envisagées dans les différents secteurs industriels doivent satisfaire aux exigences de protection de la santé, de la sécurité des consommateurs et de l'environnement, et cela de manière transparente.

Il est donc important de développer des activités de recherche ayant pour objectif l'étude des répercussions et implications des nanotechnologies dans la société (avantages, risques) :

- Impact du développement des nanotechnologies sur l'environnement, la santé, la sécurité et évaluation de leurs conséquences ; intégration des risques à toutes les phases de développement des technologies, de la recherche amont jusqu'à l'exploitation commerciale.

- Identification et mesure des conséquences sur la société au sens large : répercussions sociales éthiques et légales, répercussions économiques sur l'emploi.

- Impact sur les méthodes d'enseignement et sur l'éducation scolaire et universitaire ainsi que sur l'information du grand public.

## 2 – MICRO- ET NANOSYSTÈMES

Un micro-nanosystème peut se définir comme un système dont au moins une composante fonctionnelle est à l'échelle micro-nanométrique. Le vocable « système » sous-entend que l'on peut interagir de manière contrôlée sur son fonctionnement. Depuis quelques années, la miniaturisation extrême des micro-nanosystèmes est à l'origine de véritables révolutions dans un ensemble de domaines, qu'ils soient d'ordre appliqué ou fondamental. Les techniques de fabrication collective associées à une réduction en taille permettent en effet de réduire les coûts de fabrication, offrent la possibilité d'effectuer en parallèle un grand nombre d'opérations, accroissent les performances (augmentation de la sensibilité, réduction de la durée d'un test par exemple). En outre, l'ajout de fonctionnalités électroniques rend ces systèmes automatisables et dans certains cas autonomes.

## 2.1 LES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

L'innovation dans le domaine des matériaux et des procédés spécifiques de fabrication conditionne de manière déterminante le développement de nouveaux composants et de nouvelles fonctionnalités. Rappelons les avancées importantes rendues possibles par l'avènement de la gravure réactive profonde du silicium, du nanoimprinting (nano-impression), de la soudure de substrat. Ces procédés devront être compatibles avec de nouveaux type de substrats (souple, organique, hétérogène, fibré, biologique...) et permettre l'intégration de « nouveaux » matériaux fonctionnels (semi-conducteurs, quasi-diamant, piézo-électriques, magnétiques et piézorésistifs, métaux super-élastiques, matériaux magnétostrictifs, polymères actifs, matériaux biologiques, matériaux élasto-optiques et thermoélastiques...). Ces matériaux se présenteront sous la forme de films minces, ultraminces, poreux, sous forme de fils, de tubes, de pointes, de particules...

Les technologies d'assemblage devront particulièrement être développées afin de permettre le transfert de films minces ou de microdispositifs, l'encapsulation, la fonctionnalisation/traitement/greffage de surface, le micro/nano-usinage et la structuration de surface.

En parallèle, des technologies génériques « standards » et ouvertes ainsi que des technologies permettant une intégration ou une hybridation de l'électronique (ex : *above IC*, technologies CMOS, *flip-chip*...) doivent impérativement être étudiées, développées et/ou exploitées. Le futur CMOS en-deçà de 22 nm est délicat et l'une des voies pour l'intégration ultime de systèmes est l'intégration 3D nécessitant le développement des technologies de réalisation de via (*Through Silicon Via*), d'amincissement et d'assemblage de substrat permettant d'empiler les puces et les niveaux de substrats les uns sur les autres. Elle nécessite également le développement de nouveaux matériaux pour les connections (nanotubes de carbone, nouveaux diélectriques d'isolation...) et de nouvelles technologies pour les

interconnexions à pas très faible. Ces procédés devront de plus être « basses températures » pour être compatibles avec la plupart des structures à interconnecter.

## 2.2 LE MICRO/NANOPACKAGING

Il s'agit d'un point clé concernant les MEMS (Micro Electro-Mechanical System) qui nécessite de considérer le système dans sa globalité du point de vue du composant élémentaire, des connections électriques, des sources d'énergie et composants de stockage, des interconnexions et de la protection mécanique. Peu d'équipes en France travaillent sur cette thématique qui a longtemps été développée uniquement par les industriels du domaine. Le packaging représente cependant 80 % du coût de revient du produit final et 80 % des causes de défaillance. Le packaging des MEMS est en effet une problématique complexe. Les parties mobiles sont mécaniquement très fragiles et nécessitent souvent de fonctionner dans un vide relativement poussé dans le cas des systèmes vibrants ( $< 10^{-2}$  mbar). De plus, les environnements sont souvent hostiles ou spécifiques (MEMS implantables par exemple).

La résolution de ces problèmes nécessite de manière urgente des travaux de recherche sur les procédés d'encapsulation et d'assemblage à faible budget thermique, par transfert de films, sous vide en incluant des matériaux « getters » par exemple, d'assemblage hétérogène, d'assemblage temporaire, auto-aligné ou auto-assemblé, sur l'intégration de la connectique (électrique, fluide, optique), sur le packaging intelligent, sur la modélisation de l'influence du packaging (mécanique, thermique, électrique), sur les méthodes de caractérisation, de test et d'analyse de la défaillance ex-situ et in-situ (mécanique, thermique, environnement interne, électrique) et des études de fiabilité.

## 2.3 LES MICRO/ NANOCOMPOSANTS

Les domaines d'application des MEMS/ NEMS (Nano Electro-Mechanical System) sont extrêmement nombreux. Mais, si certains composants sont actuellement produits en très grand nombre (accéléromètres, capteurs de pression, micromiroirs...), la plupart d'entre eux restent encore limités à des développements académiques notamment en ce qui concerne les NEMS. La principale cause réside dans le fait que le composant fonctionnel peut rarement être limité au simple développement du dispositif pour la fonction. Il doit être conçu, réalisé, testé et implémenté dans un environnement plus complexe constituant le « système » et incluant l'intégration des sources d'énergie, les connexions électriques, les interconnexions, le packaging etc. Nous discuterons ici du composant en termes de générateur de fonctionnalité et non comme un micro/nanosystème fonctionnel.

### Composants pour les communications

Deux voies sont possibles pour les communications : la voie hertzienne dédiée aux liaisons faibles et moyens débits et la voie optique plus spécifiquement utilisée pour les liaisons haut débit. Ces deux modes de communications utilisent des MEMS, les RF MEMS dans le premier cas et les MOEMS (Micro Opto-Electro-Mechanical System) dans le deuxième. Dans le domaine des RF MEMS, la principale avancée concernera l'intégration des micro-capacités et des microinductances, leur montée en fréquence, ainsi que leur accordabilité qui est relativement répandue pour les capacités mais encore très originale et peu fiable pour les inductances.

Le développement des outils technologiques de microfabrication devrait permettre de continuer ces avancées et d'induire une amélioration notable des performances comme l'augmentation du facteur de qualité pour les systèmes résonants par exemple (avec la

compréhension des mécanismes de perte de surface et de volume, la modélisation de l'amortissement visqueux, le développement de géométries complexes) ou l'utilisation des métamatériaux.

Pour les liaisons haut débit, l'association MEMS et nanophotonique/phononique permet d'envisager des composants accordables multifonctions basés sur des phénomènes interférométriques ou de diffraction et pouvant potentiellement travailler à plusieurs GHz et mettant en œuvre des déplacements contrôlés à l'échelle nanométrique.

Enfin, il est indéniable que dans le domaine plus particulier des communications, l'apport des nanostructures (nano-tubes, nanofils...) aura un impact important. Tant du point de vue de la miniaturisation que de l'apport des nouvelles fonctionnalités offertes, tant au niveau du composant que du circuit voire du système, l'exploitation des nanotechnologies ouvre des perspectives de nouvelles architectures complexes qui restent à découvrir pour les futurs systèmes de communication.

Il est dès lors nécessaire de :

- Poursuivre les efforts de développement de technologies et de composants élémentaires en mettant l'accent sur les aspects de fiabilité et de packaging,
- Développer la recherche au niveau « systèmes » de communication pour tirer profit des développements au niveau composants.

### Capteurs chimiques ou biologiques/ Microfluidique

La spécificité de ce type de détecteurs est que la plupart des interactions chimiques ou biologiques ne sont généralement réalisables qu'en phase liquide. Les avancées extraordinaires dans ce domaine n'ont pu avoir lieu que grâce au développement simultané des études conceptuelles et technologiques dans le domaine de la microfluidique. Ces capteurs doivent être également généralement « bas coût », stérilisables et jetables (ou réutilisables).

Le principal objectif est généralement de coupler la spécificité de reconnaissance et l'extrême sensibilité de la mesure induite par le faible volume d'échantillon collecté. Ceci est en partie réalisé en parallélisant les systèmes de détection, en intégrant plusieurs microcapteurs sur la même puce et en fonctionnalisant les surfaces. Mais l'objectif de détecter la molécule unique est loin d'être atteint et l'exploration de nouvelles voies de détection ou de transduction doit être abordée. Dans le domaine de la microfluidique, l'exploitation des phénomènes di- et triphasiques semble particulièrement intéressante et parfaitement adaptée à la miniaturisation et à la fiabilité des systèmes.

Il est également indispensable de développer des systèmes intégrés permettant la préconcentration, l'immobilisation, le tri de nanoparticules, la collection d'échantillons et la détection sur la même puce. Dans ce souci d'intégration, l'utilisation de systèmes communicants et l'utilisation de microsources d'énergie miniaturisées paraît tout à fait indispensable, notamment dans le cas de capteurs ou actionneurs implantables.

### **Les microsources d'énergie**

Un point majeur à considérer dans la conception du MEMS est sa consommation énergétique qui doit toujours être minimisée. Actuellement, la miniaturisation de la source énergétique constitue un verrou pour l'intégration ultime de microsystèmes autonomes. Plusieurs types de sources sont étudiés comme les MEMS « de puissance » (du milliwatt à quelques Watts), les microturbines, les micropiles à combustible, microbatteries, micromachines thermiques (comme les microchambres à combustion couplées à un actionneur et un générateur). D'autre part, il faut également citer les sources de faible puissance (nanowatt au milliwatt) comme les systèmes permettant de récupérer l'énergie mécanique issue des vibrations naturelles par exemple. Les avancées technologiques dans le domaine des matériaux (synthèse et nanostructuration) sont tout à fait déterminantes pour cette thé-

matique. Le redressement, l'amplification et le stockage des grandeurs générées sont également un enjeu de tout premier plan.

### **Microcapteurs physiques**

La sensibilité, la dynamique de mesure, la bande passante et l'insensibilité à l'environnement des capteurs devront être globalement augmentées. Cette analyse multicapteurs pourra être comparée à l'utilisation d'un seul capteur reconfigurable présentant une électronique de détection, commande et test sûrement plus élaborée. Les microcapteurs en « environnement sévère » doivent particulièrement être développés.

### **Micro/nanorésonateurs**

Il est nécessaire d'ouvrir le champ d'application des résonateurs (montée en fréquence ou large bande) en augmentant la qualité des microdispositifs (stabilité, coefficient de qualité...) et en maîtrisant les mécanismes d'amortissement, de couplage et de fatigue. Les performances des nanorésonateurs utilisant des nanotubes ou nanofils sont tout particulièrement prometteuses.

## **2.4 ARCHITECTURE SYSTÈME ET CONCEPTION**

Il est maintenant convenu que les microsystèmes devront aborder de plus en plus les approches « systèmes » considérant le composant et sa technologie dans leur globalité. Pour cela, il est nécessaire de développer différentes approches complémentaires. La première consiste à disposer d'outils de conception et de prédiction du comportement du microsystème, de sa durée de vie et de sa fabrication. Les travaux doivent viser à obtenir une conception plus robuste (plus insensible aux variations de la technologie et de l'envi-

ronnement) et plus prédictive en terme de performances et de fiabilité. Ceci nécessite le développement de méthodes de conception plus globales intégrant par exemple l'électronique, le test, la fiabilité et les effets de l'encapsulation (*packaging*). La deuxième consiste à développer des outils de conception et de modélisation multiphysique pouvant être validés par des dispositifs ou véhicules expérimentaux de test dédiés. La troisième consiste à renforcer le développement de la conception comportementale (langage VHDL-AMS). Enfin, il semble important de mener des travaux pluridisciplinaires entre physiciens, électroniciens, automaticiens et informaticiens pour les aspects commande et intelligence embarquée.

## 2.5 TEST/SURETÉ DE FONCTIONNEMENT/FIABILITÉ

Les études de fiabilité de MEMS concernent le développement de la connaissance des mécanismes de défaillance et l'utilisation de cette connaissance pour établir des modèles prédictifs. C'est à ce jour le premier frein à l'industrialisation des MEMS et d'autant plus des NEMS. La principale difficulté vient de la très grande diversité des matériaux et des procédés technologiques utilisés (les caractéristiques des films minces dépendent des techniques et des conditions d'élaboration et ces caractéristiques peuvent évoluer au cours du procédé de fabrication du dispositif, mais aussi dans le temps ou différer d'un dispositif à un autre). Le manque de techniques reconnues pour la caractérisation des MEMS et le manque de standardisation quant à la fiabilité constituent également des verrous importants. La fiabilité prédictive est donc encore une thématique tout à fait balbutiante qu'il faudra à tout prix développer dans les prochaines années.

Concernant la caractérisation, il s'agit de développer des méthodes de mesure et des véhicules de test spécifiques (à différents

stades du procédé de fabrication) et des méthodes d'extraction associées permettant de caractériser des paramètres fonctionnels liés à des matériaux, à des composants élémentaires ou à des systèmes ou sous-systèmes. Il s'agit alors de développer les méthodes les plus rapides et les plus universelles possibles. Elles devront également permettre une détection très localisée notamment pour les NEMS.

Enfin, concernant le test, il devra être effectué à différents stades de réalisation du système final, tout d'abord sur tranche afin de détecter les puces défaillantes, ensuite après l'étape de *packaging* qui peut avoir introduit des contraintes mécaniques et des modifications physico-chimiques des surfaces. Il conviendra alors de qualifier le *packaging* des MEMS et de corriger ses effets sur les performances du MEMS en convenant de procédures de calibration initiales ou en cours de fonctionnement.

## 2.6 IMPACT SOCIÉTAL

La démarche du scientifique dans le domaine des nanosciences et tout particulièrement dans le développement des MEMS et NEMS doit s'accompagner d'une démarche éthique concernant l'utilisation des micro-capteurs et microactionneurs développés. La toxicité des matériaux synthétisés ou utilisés ainsi que celle des procédés utilisés doit également être un souci constant.

## 3 – PHOTONIQUE

La photonique regroupe les activités liées à la lumière et au contrôle de l'interaction entre lumière et matière. C'est un domaine de recherche à fort impact sociétal, qui apparaît aujourd'hui comme une thématique clé pour les technologies de l'information, les sciences

du vivant ou les technologies vertes. On assiste également à l'avènement de circuits performants alliant photonique et électronique ou bien encore photonique et biologie, ceci dans le but d'apporter de nouvelles solutions pour favoriser un développement durable, économe en énergie.

À travers la photonique, il s'agit de développer et de mettre en œuvre de nouveaux concepts liés à l'utilisation de matériaux massifs ou encore d'objets individuels, au contrôle ultime de la lumière en exaltant par exemple l'interaction lumière-matière, à la conception de systèmes innovants dans le domaine de l'imagerie, de la spectroscopie, des références temps-espace, ou à la mise en œuvre de nouveaux protocoles tels que ceux rencontrés dans les communications quantiques. Il s'agit également de développer des composants et circuits optimisés, miniaturisés, économes en énergie, fonctionnant dans des domaines spectraux allant de l'ultra-violet à l'infra rouge lointain. Une des clés des futurs développements en photonique sera sans doute la structuration de la matière à l'échelle des longueurs d'onde utilisées ou à des échelles inférieures, ainsi que l'utilisation des propriétés des objets de taille nanométrique comme les nanostructures semi-conductrices ou métalliques. Les développements actuels de la photonique se positionnent ainsi au cœur des nanosciences et des nanotechnologies

### 3.1 MATÉRIAUX

La mise au point de nouveaux matériaux constitue un enjeu majeur pour le développement d'une nouvelle génération de composants aux performances améliorées, ou offrant de nouvelles fonctionnalités. De nombreuses perspectives sont identifiées dans ce domaine. Elles s'appuient notamment sur de nouvelles filières de matériaux qui permettent d'accéder à des propriétés physiques jusque là peu explorées. On peut notamment citer les semi-conducteurs, les semi-conducteurs poreux, « naturellement » nano, meso ou microstruc-

turés, permettant à la fois le confinement d'électrons, de phonons et de photons, les céramiques polycristallines fonctionnelles et les nouveaux cristaux, les photopolymères, les boîtes et puits quantiques, les nanoparticules et en particulier les formes allotropiques du carbone comme les nanotubes de carbone, le nanodiamant, le graphène.

La nanostructuration de la matière constitue une autre grande tendance du domaine. En effet, l'intégration d'une structure sub-longueur d'onde au sein de composants et dispositifs photoniques permet d'atteindre un contrôle ultime de la lumière, à la fois dans le domaine spatial (confinement extrême de la lumière) et dans le domaine temporel (contrôle du temps de stockage des photons). Plusieurs axes de recherche sont aujourd'hui identifiés comme particulièrement prometteurs :

- les structures plasmoniques, exploitant des nanostructures métalliques,
- les couches minces optiques,
- les cristaux photoniques,
- les métamatériaux,
- les fibres optiques nanostructurées.

### 3.2 GÉNÉRATION, DÉTECTION, CONTRÔLE DE LA LUMIÈRE

Les composants de base sont souvent à l'origine des ruptures technologiques et un effort important de recherche doit être consacré à cette thématique qui permettra de faire émerger de nouvelles applications.

Dans le domaine des sources, il s'agit notamment de faire progresser les performances des technologies laser avec en particulier les lasers à semi-conducteurs (diodes et laser à cascade quantique), les lasers solides s'appuyant sur les nouvelles filières de matériaux et les lasers à fibre. La génération de lumière intègre également toutes les recherches menées sur les diodes électroluminescentes, à

base de matériaux semiconducteurs ou organiques, qui répondent à d'importants enjeux dans le domaine de l'éclairage par exemple.

Avec le fort développement des différentes techniques d'imagerie et des nouvelles approches pour le transport et le traitement de l'information, un besoin important est exprimé pour de nouveaux photodétecteurs. Les enjeux scientifiques sur ce sujet sont les suivants :

- Photodétecteurs rapides à bas bruit pour les télécommunications haut débit,

- Compteurs de photons à haut rendement quantique et faible taux d'obscurité, adaptés aux systèmes d'information quantique,

- Matrices de photodétecteurs dans différentes bandes spectrales (visible, proche infrarouge, infrarouge thermique et THz) à grand nombre de pixels, offrant une haute sensibilité,

- Détecteurs « intelligents » reposant sur l'utilisation de nouveaux circuits de lecture capables d'offrir de nouvelles fonctionnalités au niveau du composant.

### **3.3 TRANSPORT ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION PAR VOIE OPTIQUE**

Les besoins dans le transport et le traitement de l'information sont de plus en plus grandissants que ce soit à l'échelle d'un circuit intégré CMOS ou pour des transmissions à plus longue distance.

Dans le cadre des télécommunications optiques, le transport et le traitement de l'information se trouvent à un tournant caractérisé par la forte demande en capacité liée à l'explosion du trafic internet. L'accès « large bande » et très haut débit ( $> 1$  Gbit/s) à base de fibre optique chez l'abonné est devenu une réalité, impliquant le développement de nouvelles approches d'une part pour la transmission optique, mais également de nouvelles techno-

logies aux nœuds du « futur réseau optique ». De nouvelles techniques de transmission telles que la radio-sur-fibre (RoF) ou l'accès optique en espace libre permettront de répondre à des besoins spécifiques.

Le développement d'un réseau de cœur et d'accès à très haute capacité reposera sur la photonique où l'intégrateur de systèmes saura comment prendre avantage du potentiel de l'optique, dans une approche de plus en plus de type « boîte noire » à fonctionnalité déterminée.

Le traitement optique du signal est considéré comme la technologie-clé pour des débits de plus en plus élevés (Systèmes intégrés optiques Tbit/s multi-longueurs d'onde) pour lesquels les solutions purement électroniques deviennent impraticables. Différentes fonctions optiques sont requises pour ce type d'application : portes optiques, amplificateurs, interféromètres, circuits de contrôle de la polarisation de la lumière, gestion de la longueur d'onde et de la dispersion...

La convergence entre l'optique et l'électronique est une des clés du développement de la photonique du futur dans les systèmes de communications. Cette intégration s'appuiera sur les développements menés en microélectronique sur l'intégration 3D en particulier. Il s'agira de développer de nouvelles approches permettant de générer, de véhiculer, de traiter et de collecter des signaux optiques de faible intensité au sein même, ou à proximité immédiate des circuits intégrés.

Une autre voie est le traitement du signal dans les fibres optiques qui bénéficie de distances d'interaction importantes et s'appuie sur le contrôle de la dispersion et l'ingénierie des propriétés non linéaires du milieu de propagation. Il convient également de progresser dans la fabrication des fibres, notamment nanostructurées, et dans l'exploitation des possibilités offertes par les effets de lumière lente.

Un autre axe très stratégique et complémentaire à la transmission est celui du stockage optique de données qui devra répondre à au moins deux exigences : une durée de vie élevée et une réplique en masse aisée.

Un bon nombre de systèmes hyperfréquence pour l'avionique du futur utiliseront, en majorité, des antennes actives à balayage électronique. Compte tenu des évolutions des systèmes vers les plus hautes fréquences (jusqu'à 100GHz), l'objectif de performances de bande instantanée élevée rend de plus en plus difficile l'utilisation de câbles coaxiaux pour la distribution de signaux hyperfréquence. Pour des avantages liés au poids, volume, flexibilité, bande passante, immunité électromagnétique, la distribution optique des signaux RF dans les antennes à balayage électronique est une voie très prometteuse. La maturité et les performances notamment en termes de rendement de conversion, de bruit, de pureté spectrale et de linéarité des composants optoélectroniques, sont telles aujourd'hui qu'elles permettent d'envisager la transmission et le traitement optique des signaux hyperfréquences pour ces applications embarquées.

Les enjeux scientifiques majeurs de cette technologie peuvent se résumer ainsi :

- Amélioration des performances des liaisons optiques au niveau des composants (réduction de 10dB du facteur de bruit intrinsèque des liaisons optiques)...

- Remplacement des coaxiaux par des liaisons optiques/accroissement des performances des systèmes.

- Réalisation de circuits intégrés photoniques micro-ondes (MPIC : Microwave Photonic Integrated Circuits) par extension des MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuit).

- Développement des nanotechnologies photoniques.

- Étude de la photonique organique pour les signaux RF et haut débit (au delà des technologies OLED – Organic Light Emitting Diode).

- Nouvelles fonctions intégrées opto-hyperfréquences (filtrage, traitement optique des signaux hyperfréquences) qui restent à démontrer.

L'information quantique est une discipline en pleine expansion. Il s'agit de tirer

partie des propriétés intrinsèques à la physique quantique afin d'effectuer des tâches impossibles ou difficiles à réaliser à l'aide de ressources classiques d'information. En effet, la superposition cohérente des états et l'intrication, longtemps restées au niveau de concepts fondamentaux, sont aujourd'hui perçues comme des ressources utiles pour le calcul quantique et les communications quantiques.

Les enjeux sociétaux correspondant à ces thématiques se situent à différents niveaux. Sur le plan fondamental, la photonique offre un potentiel important pour faire progresser la connaissance sur différents sujets comme l'étude des phénomènes de localisation, des propriétés des gaz quantiques ou des phénomènes de décohérence quantique. Sur le plan applicatif, des perspectives très intéressantes sont identifiées avec la cryptographie quantique qui conduira à relativement court terme à des systèmes sécurisés pour le transport d'information, ou les recherches sur les portes logiques et les mémoires quantiques qui constituent des briques technologiques essentielles pour la réalisation d'un ordinateur quantique.

### **3.4 IMAGERIE, MESURE ET INSTRUMENTATION**

L'utilisation de la lumière donne accès à une large gamme de propriétés qui offrent un avantage compétitif certain pour la réalisation de différents types de senseurs et instruments. Le premier domaine d'application des technologies optiques est évidemment celui de l'acquisition d'images. L'imagerie est un domaine foisonnant qui recouvre pratiquement tous les domaines de la physique. Les différents enjeux pour cette thématique peuvent être structurés de la façon suivante :

- Imagerie hyperspectrale et polarimétrique, qui repose sur une analyse fine des propriétés spectrales et de polarisation de la lumière émise par un objet.

– Imagerie pénétrante, qui se développe rapidement grâce aux progrès technologiques observés dans le domaine des composants qui conduit un accès facilité à de nouvelles bandes spectrales (THz, rayons X et  $\Gamma$ ).

– Imagerie à travers les milieux diffusants avec en particulier l'exploitation ultime des modulateurs spatiaux de lumière, et l'amélioration des techniques instrumentales (tomographie, microscopie non linéaire).

– Nouveaux contrastes de microscopie, en champ lointain (fluorescence multi-photon, génération de seconde ou troisième harmonique, microscopies Raman), ou en champ proche.

– Nanoscopie optique, ou microscopie ultra-résolue (illumination structurée, synthèse d'ouverture, nanoscopies STED, PALM/STORM).

– Nouvelles approches comme la co-conception et la détection compressive, s'appuyant sur une association étroite du capteur et de traitement d'information.

Une bonne part de ces enjeux est fortement liée au développement de sources laser accordables sur de très grandes largeurs spectrales (« laser blanc » produit par supercontinuum sur des fibres à cristaux photoniques), comme de sources laser à impulsions ultra-courtes.

Les diverses techniques de spectroscopie font également l'objet de nombreux travaux de recherche, qui permettent d'améliorer les capacités des instruments pour la détection de différents types d'espèces biologiques et chimiques. Les enjeux dans ce domaine consistent à aboutir à une nouvelle génération d'instruments offrant une sensibilité considérablement accrue avec une sélectivité améliorée pour différents domaines d'application (détection de fuites, de polluants, de matières dangereuses...).

Enfin, l'utilisation des technologies photoniques est actuellement en pleine effervescence dans les domaines des sciences du vivant (imagerie fonctionnelle de fluorescence ultra-résolue) ou des « mesures extrêmes ». Des pers-

pectives scientifiques très intéressantes sont en effet identifiées dans le domaine des horloges de très grande précision, dans la métrologie des fréquences optiques ou des distances. Par ailleurs, le développement des techniques d'interférométrie à ondes de matière conduira à une nouvelle génération de gravimètres et gyromètres qui permettront de gagner plusieurs ordres de grandeur en sensibilité par rapport aux approches actuelles. Il convient également de citer les travaux en matière d'interféromètres optiques ultra-sensibles destinés à la détection des ondes gravitationnelles.

L'impact sociétal de ces activités scientifiques se situe à plusieurs niveaux, notamment dans le domaine de la physique fondamentale. Les prochaines générations d'instruments joueront un rôle essentiel pour la réalisation de différents tests qui permettront d'approfondir notre compréhension des lois physiques de l'univers (effet lense-Thirring, effet Shapiro, test du principe d'équivalence, caractérisation des ondes de gravitation, test de la loi de gravitation). Le domaine de la géophysique bénéficiera également de ces développements, notamment en matière de géodésie relativiste, via la caractérisation fine du champ de pesanteur et des fluctuations rapides de la rotation de la Terre.

Des retombées importantes de ces recherches sont également attendues dans le domaine applicatif et il est clair que les performances de pointe rendues accessibles par ces recherches trouveront naturellement des débouchés dans différents secteurs. On peut par exemple citer le domaine de la radionavigation qui nécessite des références temporelles ultraprecises. Certaines applications de défense sont également susceptibles d'être concernées avec des besoins exprimés en termes de datation-synchronisation des systèmes d'information, ou en termes d'accéléromètres et de gyroscopes de très grande précision. Au niveau de l'imagerie pour le vivant, des technologies aussi récentes que le « laser blanc » ou les nanoscopies STED, PALM/STORM, sont déjà disponibles commercialement, illustrant la dynamique importante et très concurrentielle de ce marché.

### 3.5 PHOTOVOLTAÏQUE

Ces dernières années ont été caractérisées par une prise de conscience collective des difficultés engendrées par le réchauffement climatique et la pollution. Depuis, tant à l'échelle mondiale (accords de Kyoto) que sur le territoire national (Grenelle de l'environnement), on assiste à un regain d'intérêt de la population, des politiques, des scientifiques et des industriels pour les énergies renouvelables au sens large et pour l'énergie photovoltaïque en particulier.

Le CNRS a engagé, depuis déjà un certain nombre d'années, des actions en vue de consolider les recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque au sens large. À l'initiative du programme pluridisciplinaire sur l'Énergie (PIE), il poursuit aujourd'hui son engagement en soutenant les laboratoires via des crédits spécifiques ou l'affichage de postes. En parallèle, le Ministère a créé l'Agence Nationale de la Recherche, dont certains appels d'offres thématiques participent aussi de cette dynamique autour des énergies renouvelables et plus particulièrement de l'énergie solaire appliquée à l'habitat, comme l'ANR «HABISOL» ou le programme «Solaire Photovoltaïque». L'implication d'acteurs importants tels que le CEA, EDF, TOTAL ou GDF-SUEZ a également contribué à une certaine dynamique pour la recherche. Au niveau européen, certains programmes RTD affichent également clairement des appels spécifiques sur la thématique photovoltaïque, du matériau au stockage.

Les activités de recherche concernent essentiellement des études sur les matériaux pour la conversion, les procédés d'élaboration, la fabrication de composants élémentaires, les modélisations de nouveaux concepts de cellules, ainsi que les problèmes de convertisseurs et de connexions au réseau. Ces recherches concernent essentiellement la section 08, mais également les sections 10, 14 et de plus en plus des sections de l'Institut de Chimie pour les cellules organiques et hybrides.

Les études menées par ces laboratoires peuvent être regroupées en 5 catégories :

- Pour la filière concernant **les cellules à base de silicium en plaquettes ou ruban**, les activités s'attachent à développer des procédés de fabrication de lingots aussi bien que de nouvelles architectures de cellules (hétérojonction, passivation, contacts en face arrière...) pour améliorer l'efficacité de collecte. L'objectif est un rendement de conversion de plus que 20% sur des cellules de grande dimensions et faibles épaisseurs (< 50  $\mu\text{m}$ ), et un coût < 1 Euro/Wp.

- Pour la filière **couches minces à base de silicium** (amorphe a-Si, microcristallin  $\mu\text{c-Si}$ , polycristallin pc-Si), il s'agit d'étudier la cristallogenèse du silicium très mince (< 2  $\mu\text{m}$ ) sur des substrats variés, et de corréliser les propriétés optoélectroniques et de structure des couches Si formées, et enfin en faire des cellules/modules avec le plus haut rendement et stables.

- Pour la filière **couche mince à base de matériaux chalcopryrites** (Cu, In, Ga, Se, S) qui présente également un potentiel en haut rendement de conversion et faible coût, les activités de recherche menées concernent la synthèse des couches et cellules, les analyses des interfaces, le développement de structures tandem avec d'autres matériaux pour une exploitation maximale du spectre solaire. L'existence d'une plateforme sur le site R&D d'EDF (Chatou) constitue un atout majeur pour cette filière.

- Pour la filière **hybride et organique**, il s'agit d'étudier divers matériaux polymères et petites molécules, en les associant ou pas à des matériaux inorganiques (nanocristaux semi-conducteurs, nanotube de carbone, graphène...).

Des actions plus transversales à toutes ces filières sont également en pleine expansion. On peut citer le développement de nouveaux oxydes transparents conducteurs tels que ZnO, qui sont fonctionnalisés (par exemple luminescent) ou pas et qui peuvent servir quelle que soit la filière. Il y a également des recherches dans l'exploitation des nanomatériaux (boîtes et fils quantiques semi-conducteurs, nanoparticules métalliques) pour l'exaltation de la luminescence et/ou de

l'absorption de la lumière ou l'ingénierie de nouveaux matériaux. D'autre part, la structuration de la matière à l'échelle de la longueur d'onde peut apporter des solutions dans l'amélioration de l'efficacité de futures cellules. Enfin, une petite partie de la communauté du Génie électrique est également active du côté des systèmes et de la gestion électrique de l'énergie photovoltaïque.

## 4 – MICRO- ET NANOÉLECTRONIQUE

Que ce soit à domicile, au bureau ou dans les déplacements, la vie moderne est de plus en plus dominée par l'électronique. Depuis plus de 50 ans, le développement des dispositifs microélectroniques, et maintenant très souvent nanoélectroniques, a bouleversé notre mode de vie en proposant un vaste choix de produits et de services. Le progrès technologique rend possible la réalisation de nouveaux objets et fonctions dont certains donnent lieu à des marchés considérables. Depuis des voitures plus sûres et plus respectueuses de l'environnement, en passant par des systèmes de communications fixes et mobiles toujours plus sophistiqués et des équipements multimédia et ordinateurs de plus en plus puissants, jusqu'à des systèmes personnels d'assistance médicale, sans oublier les loisirs, l'éventail applicatif ne cesse de s'élargir et de se diversifier.

Entre recherche et enseignement, production et marché, il y a un cercle vertueux dont le prolongement implique la nécessité de maintenir et développer une recherche scientifique et technologique de haut niveau garante des progrès futurs. Pour être le plus efficace possible, cette recherche doit être structurée et complémentaire des recherches plus appliquées ou industrielles, et, pour bénéficier d'un maximum de synergie, elle doit être menée en interaction avec les organismes correspondants. La recherche à caractère plus académique doit cependant pouvoir égale-

ment s'appuyer sur des ressources technologiques propres du meilleur niveau. Dans ce contexte, le réseau RENATECH des grandes centrales de technologie pour la Recherche Technologique de Base (RTB), associant le CNRS et le CEA-LETI, joue indéniablement un rôle important et structurant au profit des laboratoires français.

### 4.1 COMPOSANTS ÉLÉMENTAIRES

#### Le MOSFET ultime

Depuis l'avènement des circuits intégrés en technologie CMOS silicium, les évolutions technologiques se caractérisent par une miniaturisation toujours plus poussée respectant la « loi de Moore ». Les principaux défis scientifiques à court et moyen terme pour maintenir ce rythme d'évolution sont régulièrement détaillés dans la feuille de route de la microélectronique (« ITRS roadmap » (1)) et ne sont donc pas repris d'une façon exhaustive dans ce document. Parmi les principaux verrous nécessitant un investissement particulier, on peut néanmoins citer :

- Le développement des techniques de lithographie optiques ultimes ou alternatives (nano-impression, auto-assemblage...) et les techniques de caractérisation associées.
- Le développement de nouveaux matériaux compatibles « silicium » pour contourner les limites physiques atteintes avec les matériaux traditionnels, par exemple :
  - Diélectriques de grille à très forte permittivité pour des épaisseurs équivalentes d'oxyde sub-nanométriques sans courant de fuite abusif,
  - « Nouveaux » matériaux à très forte mobilité pour le canal (intégration de III-V, Ge, alliages SiGe, ingénierie des contraintes, etc.),
  - Diélectriques à très faible permittivité pour les interconnexions.
- La modélisation physique des structures ultimes (prise en compte des effets quantiques et fluctuations statistiques).

- Le développement de nouvelles architectures de composants non planaire (SOI – Silicon on Insulator – multi-grilles) : modélisation physique et réalisation technologique.

La communauté scientifique française, couvrant un large champ de compétences, est bien positionnée au niveau européen où elle est fortement impliquée dans les principaux programmes du 7<sup>e</sup> PCRD. Bien structurés autour des acteurs majeurs (STMicroelectronics au plan industriel et le LETI pour l'intégration « pré-industrielle »), les laboratoires concernés semblent bien armés pour relever les défis de l'accompagnement de la fin de la loi de Moore.

## Au delà du CMOS

À terme (fin de la « roadmap » d'ici une dizaine d'années?), la miniaturisation des composants de type MOSFET ne sera probablement plus possible et des solutions alternatives devront être implémentées pour améliorer les performances, si possible compatibles avec la technologie de base de type CMOS.

Pour explorer cet avenir à plus long terme, il est impératif de développer des recherches exploratoires sur les nouveaux matériaux et architectures de composant à mettre en œuvre. Parmi les études semblant les plus prometteuses, on peut citer les nouveaux oxydes fonctionnels (permettant par exemple de nouveaux concepts de dispositif de mémorisation de l'information), les nanofils (carbone, Si ou autres semi-conducteurs) et le graphène, ainsi que l'électronique moléculaire compatible CMOS (intégration hybride).

Même si la priorité se situe légitimement encore au niveau du fondamental (physique, chimie) pour la compréhension des mécanismes de base, il faudra veiller à ce que les nouveaux concepts développés ne restent pas uniquement des « exploits » de laboratoire, mais prennent en compte la faisabilité d'intégration industrielle. Le GDR « Nano-électronique » qui regroupe la majorité des laboratoires français du domaine semble bien placé pour structurer cette communauté et insuffler les collaborations nécessaires.

## L'électronique organique

L'électronique organique, aussi connue sous le nom d'« électronique plastique » utilise des matériaux semi-conducteurs dont la formulation est basée sur la chimie du carbone. Ce sont bien les propriétés qui résultent des interactions entre un ensemble de molécules qui sont utilisées dans les applications de l'électronique organique. Si l'on s'intéresse aux applications, les dispositifs de l'électronique organique se classent en quatre catégories : les diodes électroluminescentes (OLED), les cellules photovoltaïques (OPV), les transistors à effet de champ (OFET) et les capteurs.

Il n'y a pas en France un laboratoire reconnu et identifié en tant que tel sur cette thématique, mais une multiplication de petits groupes de recherche qui ne comprennent que quelques chercheurs permanents dans des disciplines variées (chimistes, physiciens, électroniciens...). Si cette situation peut présenter quelques avantages, elle entraîne également des handicaps, en particulier une quasi-absence des équipes françaises dans les projets européens, dans les éditions spéciales des journaux scientifiques qui traitent de l'électronique organique et dans les conférences spécialisées comme la Gordon Conference 2008 « Electronic processes in organic materials » (1 représentant français). Malgré tout, la communauté française est beaucoup mieux représentée dans les conférences plus ouvertes comme ECME. Compte tenu de l'importance actuelle de ce domaine et plus encore de celle qu'il est amené à prendre dans le futur, il apparaît inconcevable que la France soit absente d'un secteur d'activités potentiel de 30 milliards de dollars en 2015. Selon IDTechEx dans son rapport Organic & Printed Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2007-2027, « ... peu d'autres technologies auront sur le secteur un impact aussi important dans les vingt prochaines années. Sous forme d'applications pour les emballages intelligents, les panneaux électroniques, les affiches, les signaux et les livres électroniques, l'électronique organique va influencer sur les secteurs de l'imprimerie et de l'édition conventionnelle. L'éclairage organique va impacter les ventes du secteur de

l'éclairage, l'incandescent comme le fluorescent». Notons également qu'une des spécificités de l'électronique organique est de tendre vers des moyens de production bas coûts applicables ou non aux grandes surfaces. Du fait de la «simplicité» de mise en œuvre des semiconducteurs organiques, il sera tout à fait envisageable de voir se disséminer des petites unités de productions comme nous en avons vu apparaître pour le tirage des photos numériques.

Dans ce contexte, la création d'un GDR «Electronique organique» est une excellente initiative qui va permettre de fédérer et d'organiser les recherches du domaine. Les problématiques devant être abordées concernent la couche active, les substrats et couches conductrices, la physique des semiconducteurs organiques, la durée de vie des matériaux et des dispositifs (passivation et encapsulation, fiabilité), le couplage optique – interaction onde matière, et les composants et circuits. Une proposition consisterait à fédérer les moyens technologiques et à les rattacher aux centrales RTB.

## 4.2 CIRCUITS ET SYSTÈMES

L'apparition ces dernières années des systèmes in Package ou des systèmes on Chip (SiP – SoC) a rendu de plus en plus complexe la conception des circuits intégrés ainsi que leur test ou leur calibration. Dans le même temps, ces composants ont envahi presque tous les domaines de la vie courante (communications, transport : automobile-aéronautique-spatial, santé, jeux...). Pour la plupart de ces domaines, on attend de ces systèmes qu'ils garantissent une sûreté de fonctionnement optimale. Pour répondre à cette demande sociétale, les circuits intégrés électroniques se doivent d'être facilement testables, de plus en plus fiables et reconfigurables si possible dynamiquement.

Face à ces défis, sont apparues des techniques de conception orientées Test (COT) ou Fiabilité (COF) qui intègrent des circuits uni-

quement destinés à améliorer la testabilité ou la fiabilité. En parallèle, la part grandissante du numérique dans les CI a permis le développement des logiciels enfouis, facilitant la reconfigurabilité des systèmes.

L'autre caractéristique des systèmes électroniques est leur capacité à communiquer. Ces nouveaux systèmes communicants sont dès maintenant présents dans plupart des objets courants. Il suffit d'allumer son ordinateur dans un hall de gare ou d'aéroport pour constater que les PC se reconnaissent les uns les autres et que dès lors peuvent se créer spontanément des réseaux. C'est le même principe qui est mis en œuvre dans le cadre des réseaux de capteurs pour la surveillance des installations industrielles, ou la surveillance des incendies, etc. Pour les systèmes impliqués dans de tels réseaux une problématique supplémentaire survient : l'autonomie énergétique.

Dans ce domaine le GDR a permis la fédération des différents acteurs.

Les problématiques actuelles concernent l'autonomie énergétique et la consommation, l'interopérabilité des systèmes, la sûreté de fonctionnement et la fiabilité, la sécurité des échanges (cryptographie), les aspects sociaux (par exemple acceptabilité de la RFID – Radio Frequency Identification -, appropriation de la complexité), les logiciels embarqués et les architectures matérielles, les architectures reconfigurables, le test et la tolérance, les méthodes et outils de conception AMS & RF, les systèmes hétérogènes, ainsi que les technologies émergentes.

## 4.3 NANOMAGNÉTISME

### Spintronique

Traditionnellement le spin des électrons n'était pas utilisé dans les dispositifs électroniques. Depuis une vingtaine d'années, cette électronique de spin s'est fortement développée, à la fois en terme de compréhension fondamentale des phénomènes de transport

dépendant du spin (périmètre de la section 06), mais aussi du côté de leur mise en œuvre dans des dispositifs tels que les capteurs magnétiques magnétorésistifs qui ont atteint le stade industriel.

## Magnétorésistance

Plus récemment, les performances des capteurs magnétorésistifs ont continué à progresser (magnétorésistance tunnel à barrière MgO) et ces améliorations fondamentales (filtrage en spin) ont rapidement été transférées aux dispositifs. Ces capteurs sont utilisés de façon individuelle, plus ou moins miniaturisés, et sont aussi l'élément de base d'une famille de mémoires magnétiques non volatiles (MRAM: Magnetic Random Access Memory). Ces mémoires ont aussi atteint le stade commercial pour des applications niches car leur densité reste très inférieure à celle des mémoires semi-conductrices mais leur non-volatilité, la rapidité d'écriture et la cyclabilité sont des facteurs compétitifs. Les laboratoires français sont particulièrement actifs pour développer de nouveaux concepts et de nouvelles générations d'éléments de mémoires MRAM.

L'élément magnétorésistif au cœur de la MRAM est aussi mis en œuvre pour le développement de mémoires programmables dans le champ émergent de la logique magnétique. Ceci permet d'intégrer le stockage de données et la programmation de fonctions.

## Transfert de spin

Depuis moins d'une dizaine d'années le couple de transfert de spin, phénomène dual de la magnétorésistance géante, est aussi le sujet d'une quantité exponentiellement croissante de travaux.

L'interaction d'un courant polarisé en spin avec l'aimantation d'un nanoélément peut conduire à un renversement d'aimantation sans application de champ magnétique. Ceci entraîne une simplification des dispositifs

par disparition des lignes sources de champ magnétique. Des vitesses d'écriture de l'ordre de 100 ps peuvent aussi être atteintes par renversement précessionnel de l'aimantation.

À plus basse densité de courant, le couple de transfert de spin induit une oscillation de l'aimantation. Ce phénomène couplé à la magnétorésistance est à l'origine d'une nouvelle famille d'oscillateurs hyperfréquence accordables. Pour l'instant les puissances émises restent modestes mais le sujet est récent et en plein développement, en particulier au niveau français.

## Contrôle électrique

L'objectif de contrôler le spin des électrons ou l'aimantation par un champ électrique donne lieu à des recherches fondamentales très actives. Dans le futur, des dispositifs devraient émerger que ce soit en électronique et opto-électronique (transistor magnétique, LED polarisée) ou en dispositifs et microsystèmes accordables associant magnétisme et ferroélectricité ou piézoélectricité.

## Nano et Micromagnétisme

L'étude du nanomagnétisme est particulièrement active du côté fondamental (section 06) ainsi que du côté des nouveaux matériaux fonctionnels. En l'absence d'acteur industriel majeur dans le domaine de l'enregistrement magnétique (disque dur), les efforts doivent se concentrer sur les ruptures technologiques que peuvent apporter l'utilisation de nouveaux effets dans des dispositifs ainsi que l'intégration des matériaux magnétiques fonctionnels évoquée par ailleurs dans ce rapport (inductances intégrées, microsystèmes magnétiques).

## 5 – ONDES, COMPOSANTS ET SYSTÈMES HAUTES FRÉQUENCES

Le domaine des hautes fréquences et de leurs applications est parfaitement identifié selon des thématiques allant des matériaux-composants aux systèmes. Pour l'ensemble de ces thématiques, la France se situe dans les dix premières nations en termes de production scientifique (source Web of Sciences). Les challenges concernent l'accroissement des performances (fréquence, puissance, faible consommation) et l'intégration des dispositifs et systèmes. Le cœur des activités reste lié aux applications et verrous industriels. Néanmoins la progression des technologies conventionnelles (silicium, III-V) incluant des dispositifs actifs et passifs est proche d'atteindre son apogée. À titre d'exemple, les fréquences de coupure des filières silicium (CMOS, BiCMOS) atteignent 0,5 THz, elles sont proches du THz pour certaines filières III-V. C'est une raison pour laquelle une partie de l'activité est en train de se diversifier en orientant la recherche vers les nouveaux défis que sont les nanotechnologies, l'énergie, les futurs systèmes de télécommunication, le développement durable, etc. Dans ce cadre, le soutien significatif d'activités à la croisée de disciplines telle que la biologie, la chimie, la physique et la biophysique, est primordial. Ces recherches touchent le domaine des matériaux offrant de nouvelles propriétés remarquables en haute fréquence, des nouvelles voies technologiques pour répondre à de nouveaux défis (conformabilité, compatibilité environnementale pour de nouvelles applications sociétales...), mais aussi les approches théoriques (modélisation) et conceptuelles des nouveaux systèmes et réseaux de communications (intelligence ambiante, communications numériques, objets communicants...) et de leurs briques de bases (composants, antennes, etc.).

### 5.1 DISPOSITIFS ET NANO COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

Pour les filières conventionnelles de composants et circuits, les technologies CMOS et BiCMOS SiGe dominent le marché des circuits numériques analogiques millimétriques et mixtes analogique-numérique. Les filières III-V, notamment InP (maintenant disponible sur substrat GaAs au niveau industriel), permettent d'adresser des niches applicatives. Les filières à base de composés antimoniés sont aussi une alternative crédible pour la réalisation de composants hautes fréquences à ultra faible consommation. Ces futures technologies peuvent adresser des applications en gamme millimétrique (imagerie, détection de molécules...), mais également en gamme centimétrique pour les systèmes de communication autonomes en énergie. Toujours dans le domaine des filières technologique III-V, les activités autour du GaN suscitent encore un grand intérêt pour de nombreuses applications civiles, militaires, et récemment pour le spatial (projet ESA). Les efforts visent à réaliser des circuits intégrés de puissance MMIC jusqu'à 100 GHz. Les avancées sur les matériaux, en particulier la croissance d'hétérojonctions à base de GaN sur silicium (ou matériaux composite faible coût à base de silicium), permettent d'adresser des applications civiles à grande échelle (électronique de puissance).

Dans le domaine des sources, une des priorités consiste toujours à combler le manque de dispositifs performants dans une bande de fréquence située entre le domaine de l'optique et du sub-millimétrique : le gap terahertz (THz). Pour les applications visées telles que la spectroscopie THz ou l'imagerie, le verrou est toujours lié à la faible puissance des sources à état solide. Des progrès ont été obtenus pour les QCL (Quantum Cascade Laser), en particulier à base de matériaux antimoniés, en améliorant le compromis entre longueur d'onde et température de fonctionnement. Les challenges relatifs aux systèmes rayonnants dans ce domaine sont abordés au chapitre suivant.

Les études entamées depuis quelques années sur des nanomatériaux tels que les nano-fils semi-conducteurs, les nanotubes de carbone métalliques et semi-conducteurs, ou le graphène, restent d'actualité pour leurs propriétés électroniques, électromagnétiques, mécaniques, chimiques. Le niveau de publications (2009) dans ce domaine reste élevé tant sur les aspects fondamentaux qu'applicatifs. En particulier au cours de l'année 2009, des progrès remarquables ont été démontrés pour les dispositifs hautes fréquences à base de graphène, poussés par de grands programmes DARPA (USA).

L'approche conception logicielle « software design » se généralise par ailleurs tant pour les systèmes de communication que les systèmes radar. Cette approche logicielle basée sur le traitement et la génération de signaux complexes par voie numérique n'est actuellement freinée que par les limitations fréquentielles des convertisseurs analogique/numérique. On peut raisonnablement envisager que dans quelques années, les circuits analogiques seront réduits aux seules fonctions d'amplification de puissance ou à faible bruit et de conversion de fréquence et de filtrage.

## **5.2 COMPOSANTS, CIRCUITS ET DISPOSITIFS PASSIFS ET ACTIFS**

Dans ce domaine, sur le plan technologique, les principaux challenges concernent la recherche de nouvelles solutions, notamment basées sur l'utilisation de nouveaux matériaux commandables ou déformables (commande électrique, magnétique, pneumatique, optique, etc.) et sur l'utilisation de méta-matériaux, de l'ingénierie de bande et de configurations multicouches (éventuellement hybrides) à fort degré d'intégration.

De nombreux travaux portent sur les matériaux à faible ou à forte permittivité pour la réalisation d'éléments localisés de type capacité ou inductance pouvant être intégrés dans une technologie Silicium. Dans cette voie, les

matériaux composites basés sur l'utilisation de ferroélectriques et/ou de ferromagnétiques trouvent de nombreuses applications et offrent la perspective de meilleures performances pour les composants et de nouvelles potentialités comme l'agilité en fréquence des composants ou des surfaces.

La technologie MEMS est également une voie très explorée, notamment dans la réalisation de capacités variables, de commutateurs à actionnement électrostatique ou d'antennes reconfigurables. Actuellement les objectifs visent à abaisser les tensions de commande (pour faciliter leur intégration avec la technologie CMOS) et à diminuer les temps de commutation (afin de rendre compatibles ces éléments dans des circuits de commande de reconfigurabilité en temps réel). Ces composants souffrent cependant de problèmes de fiabilité qui doivent être résolus afin de lever ce point bloquant pour leur intégration dans les systèmes.

Deux types de circuits, conçus à partir des dispositifs passifs élémentaires, constituent l'essentiel des chaînes de télécommunications : les dispositifs de filtrage de signaux et les éléments rayonnants (antennes). La miniaturisation de ces dispositifs est un enjeu important aux fréquences inférieures à quelques GHz, notamment en vue de leur utilisation dans les systèmes embarqués et de leur intégration au plus près des circuits afin de faciliter leur connexion aux autres éléments. Une tendance vise à l'intégration hétérogène complète de ces composants passifs avec les circuits actifs dans une approche de type SIP (System In Package). Dans le domaine des hautes fréquences (ondes millimétriques et sub-millimétriques), l'un des enjeux consiste aussi en la conception de dispositifs rayonnants 2D ou 3D, à fort rendement, reconfigurables, et ou multi-fonctions. En particulier, les antennes large bande grand gain (réseaux réflecteurs, réseaux transmetteurs, systèmes focalisants et lentilles, antennes à ondes de fuite) constituent l'un des verrous à lever pour les systèmes de communications large bande, les systèmes radars (automobile, etc.) et les systèmes de détection, de surveillance et d'imagerie. En termes de performances

électriques, le défi est là aussi l'obtention d'une flexibilité ou reconfigurabilité pour répondre aux besoins des nouveaux systèmes de communication participant à une intelligence ambiante.

Ceci est particulièrement vrai pour les antennes qui devront présenter une reconfigurabilité multi-standards de leurs caractéristiques (diversité de diagramme, de fréquence ou de polarisation) et être associées à des circuits de commande de très petite taille, intégrés au plus proche de ces antennes sans que leurs performances soient dégradées (compacité, CEM –Compatibilité électromagnétique-, etc.). Ces composants devront également intégrer des fonctions intelligentes qui permettront par exemple de router l'information avec une gestion optimale de l'énergie.

Dans le domaine des résonateurs, plusieurs technologies semblent importantes (technologie BAW – Bulk Acoustic Wave –, résonateurs à nano-gaps). Il s'agit en particulier de rechercher de nouveaux concepts permettant la montée en fréquence de ces composants, leur adaptation dans des dispositifs plus complexes et enfin leur intégration dans une technologie CMOS. Enfin, même si leur domaine de prédilection est avant tout l'optique, les métamatériaux et les matériaux artificiels sont une solution originale pour la réalisation de composants performants en micro-ondes et en millimétrique (filtres, antennes multifréquences, dispositifs et antennes compactes...). La mise au point de ces matériaux, pour un fonctionnement à des fréquences relativement basses et l'optimisation des topologies de circuit, est encore en développement.

Sur le plan de la modélisation électromagnétique, de nombreux problèmes restent à résoudre, tels que la modélisation de circuits et antennes en environnement complexe (corps humain, structures de grande taille, etc.) ainsi que le développement d'outils d'analyse électromagnétique rapide, d'optimisation et de synthèse. Cela concerne de nombreuses classes de méthodes numériques (méthodes hautes fréquence, méthodes globales temporelles ou fréquentielles, etc.) et constitue l'un des enjeux majeurs à relever dans ce domaine.

## 5.3 CONCLUSION

La visibilité de la recherche française dans ce domaine tient à plusieurs facteurs tels que :

- des orientations en accord avec les priorités de l'industrie, de la défense, des télécommunications et du spatial,

- des moyens technologiques et métrologiques des laboratoires au meilleur niveau.

Depuis plusieurs années, on observe une diversification des travaux de recherche vers des secteurs tels que les nanotechnologies, l'énergie, les futurs systèmes de télécommunications, le développement durable, les nouvelles méthodes numériques. Des travaux sont également menés aux interfaces entre disciplines : matériaux – chimie – ingénierie ; nanotechnologie – physique ; ondes – biologie et santé ; ondes – biophysique ; électronique – ingénierie de l'information – SHS, etc.

En tenant compte de ce préambule, l'activité fait face à un dilemme entre des actions valorisantes à court terme (en termes de budget, production scientifique, recrutement de personnels sur contrats) et une diversification salvatrice des activités avec des objectifs à long terme tout en incluant le mariage des disciplines (STIC/santé, STIC/Chimie, Maths/STIC, STIC/Physique). Il doit également être tenu compte du fait que ce domaine de recherche est mené par un personnel constitué majoritairement d'enseignants-chercheurs. Enfin, bien que l'analyse du secteur montre une activité en « bonne santé » et à l'équilibre, on peut s'interroger, sans pessimisme exacerbé, sur son devenir si deux facteurs importants venaient à changer :

- Modification du paysage industriel pour les applications de la défense, sécurité, télécommunications, spatiales, etc.,

- Décroissance du nombre de personnels non permanents (défection dans les formations spécialisées, difficultés d'attractivité des étrangers dans les laboratoires, etc.).

Si toutes les grandes thématiques du domaine auraient besoin d'actions de renforce-

ment, deux d'entre elles le mériteraient en particulier : les activités à forte teneur technologique/métrologique et les activités dans le domaine des architectures des dispositifs et systèmes et de l'interface « hard/soft » pour les futurs systèmes de télécommunication. Pour le premier domaine, les activités technologiques drainent de nombreuses autres thématiques plus généralistes telles que la modélisation électromagnétique et l'optimisation, l'électronique haute fréquence, les futures applications. Pour le second (circuits, antennes, systèmes, architecture), l'état des lieux montre en outre qu'un renforcement est nécessaire, en particulier un accroissement du personnel CNRS (CR, ITA notamment). Par ailleurs, cette thématique s'inscrit dans les futurs défis sociétaux dans les domaines de la sécurité, de la mobilité, de l'environnement, de l'aide à la personne, de l'impact sanitaire et environnemental de nouveaux types de signaux (applications sans fil émergentes, applications médicales).

La représentativité des chercheurs temps plein (CNRS) est relativement faible pour la majorité des thématiques. Ce rapport est encore plus faible pour les activités relatives à la conception de circuits/antennes/systèmes hautes fréquences (micro-ondes, millimétrique). Le nombre de personnels permanents en regard du nombre de non permanents se situe entre 0,6 et 1. Même si cette constatation peut être admise par le fait d'une forte activité contractuelle, le nombre de doctorants, post-doctorants et ingénieurs contractuels doit être surveillé à court terme.

Des rapports de veille technologique établissent une feuille de route riche en recherches de base et applicatives pour les vingt prochaines années : il s'agit du domaine de l'électronique imprimée (multicouche, hybride, organique, etc.) pour la photonique ou le photovoltaïque. Pour la partie électronique (circuits, composants, antennes), et en particulier les micro-ondes et l'électromagnétisme, les défis à relever concernent les performances fréquentielles (et notamment la montée en fréquence (millimétrique, THz), le développement de méthodes numériques rapi-

des adaptées à la synthèse électromagnétique, l'autonomie en énergie, les communications numériques. Les avantages souhaités et porteurs d'applications sont la flexibilité/conformabilité, la compatibilité avec l'environnement (ecoTIC), la transparence, la reconfigurabilité, l'intégration, la miniaturisation, l'augmentation des fréquences de fonctionnement et des débits, etc. Par ailleurs, il est fondamental de favoriser la construction de projets de recherche pluridisciplinaires à la croisée de disciplines telles que l'électronique au sens large et les sciences de la matière, du vivant et de la santé.

## 6 – GÉNIE ÉLECTRIQUE

Dans les recherches menées en génie électrique, les grandes tendances actuelles sont guidées par des demandes sociétales fortes, dont la principale relève depuis quelques années de préoccupations liées à l'écologie. Le Grenelle de l'Environnement, la sensibilisation du public aux émissions de carbone, l'introduction récente de véhicules hybrides et de véhicules électriques dans un avenir proche, sont des exemples de facteurs qui contribuent à une amélioration de l'efficacité énergétique globale obtenue grâce aux progrès accomplis dans tous les maillons de la chaîne énergétique, des composants aux systèmes en passant par la production, le transport, le stockage et la conversion de cette énergie avec un niveau de sûreté le plus élevé possible. Les autres enjeux technologiques, économiques et sociétaux auxquels le génie électrique se doit de répondre sont la mobilité et la disponibilité énergétique, l'apport de solutions pour l'investigation, les traitements médicaux et l'assistance de fonctions vitales.

Aujourd'hui, le génie électrique se décline du système à l'échelle d'un continent (réseaux d'énergie interconnecté) aux objets micro- voire nanométriques, du gigawatt au

milliwatt. La démarche développée est en général de plus en plus de type « système », et les recherches bâties sur un socle fort de sciences physiques impliquent de nombreuses disciplines comme l'automatique, la mécanique, l'électronique, l'informatique, les matériaux, les mathématiques appliquées, les sciences de la vie, la thermique...

## 6.1 VERS UNE MEILLEURE EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

En Europe, l'électricité est la troisième source d'énergie disponible pour la consommation finale avec 21 % de l'énergie totale (1171 MteP – Mégatonnes équivalent pétrole –).

Dans l'industrie en France, la motorisation représente le poste principal de consommation de l'électricité. Dans les applications de transport pour lesquelles l'électricité n'est pas l'énergie disponible pour la consommation finale, un nombre croissant d'équipements électriques sont installés pour réaliser des fonctions nouvelles, de confort en particulier, ou en remplacement d'autres solutions technologiques (actionnement ou propulsion par exemple), en apportant un gain de la masse embarquée et donc une réduction significative de la consommation d'énergie primaire. Pour améliorer l'efficacité énergétique, trois axes doivent être suivis :

### Amélioration de l'efficacité énergétique des composants

L'amélioration des propriétés fonctionnelles des matériaux permet de réduire les pertes et d'améliorer la densité de puissance des composants, facilitant ainsi leur utilisation et le fonctionnement dans des environnements sévères. Par exemple, la diminution des pertes fer des transformateurs électriques correspond à un enjeu particulièrement important. La conception de dispositifs de conversion à haut rendement (électronique de puissance et actionneur), compacts, capables

de tenir des niveaux de tension et de courant divers et des environnements sévères, et l'intégration du convertisseur électronique au plus proche de l'actionneur facilitent l'utilisation des actionneurs dans leurs conditions optimales.

### Amélioration de l'efficacité énergétique dans la chaîne énergétique

Les réseaux de distribution et l'intégration des sources locales sont des points qui restent aujourd'hui cruciaux. En effet, une solution pour réduire les pertes dans la distribution de l'énergie électrique consiste à produire l'énergie électrique au plus proche de la consommation. Aussi l'interaction entre les différentes sources locales (cogénération), le stockage et le pilotage du réseau doit-elle être étudiée. En particulier, le contrôle coordonné génération-stockage-charge est un point clef de l'efficacité énergétique globale de la chaîne énergétique « électrique ».

### Optimisation globale du système énergétique

Si des recherches pour l'optimisation de chaque constituant vis-à-vis de l'efficacité énergétique sont indispensables, l'optimisation globale des architectures, qu'elles soient électriques ou multi énergies, permet d'identifier le ou les composants clefs à optimiser. En particulier, le contrôle et la gestion optimale de l'énergie, l'analyse des cycles de vie, la sûreté de fonctionnement et la maîtrise des nuisances doivent être pris en compte dans cette optimisation globale. Pour atteindre cet objectif, la modélisation multiphysique et prédictive, notamment des pertes (diélectrique, magnétique...), est un point complexe mais essentiel.

## 6.2 MATÉRIAUX INNOVANTS

Les ruptures technologiques passent très souvent par la maîtrise des propriétés des

matériaux existants, l'élaboration de nouveaux matériaux aux fonctionnalités nouvelles. La thématique des matériaux prend donc une place importante dans les laboratoires de génie électrique. Les gains attendus sont multiples, comme par exemple le gain de masse et de compacité des systèmes, la compatibilité des composants dans le biomédical, l'amélioration de l'efficacité dans un contexte d'isolation thermique, électrique, magnétique, acoustique, etc. Les verrous se situent à plusieurs niveaux, de l'élaboration du matériau jusqu'à son introduction dans le système en intégrant les contraintes spécifiques à chaque application, et pour lesquelles connaissance et caractérisation demeurent conjointement au cœur des préoccupations.

### **Performances fonctionnelles**

Les principales améliorations des fonctions attendues des matériaux dans le génie électrique concernent leurs aptitudes à stocker de l'énergie électrostatique (diélectrique à conductivité électrique maîtrisée et variable, haute permittivité) ou électromagnétique (haute perméabilité, saturation magnétique élevée), à évacuer la chaleur (matériaux à conductivité thermique maîtrisée), à réduire les pertes par conduction (supraconducteur à haute température critique).

### **Tenue aux conditions extrêmes**

Le contexte d'utilisation de ces matériaux devient de plus en plus contraignant, que ces contraintes soient intrinsèques ou extrinsèques. Aussi, les efforts doivent porter sur la tenue de ces matériaux soumis à de hautes ou de basses températures, ou à de fortes sollicitations mécaniques et électriques. Ces contraintes soulèvent de nouvelles questions de prédiction du vieillissement, de la durée de vie et de la fiabilité dans un contexte de maintenance prédictive ; pour y répondre, une modélisation de la complexité et des interactions des phénomènes devient nécessaire.

### **Élaboration et mise en œuvre dans l'application**

Dans l'élaboration de nouveaux matériaux, des champs d'investigation apparaissent dès que l'on considère l'apport de nanorenforts (élaboration de nanocomposites par exemple) dont il convient de maîtriser les propriétés individuelles et collectives. Les préoccupations écologiques conduisent par ailleurs à des réflexions et recherches autour des écomatériaux, dont le mode de fabrication économise l'environnement et l'énergie, et qui présentent une recyclabilité mieux maîtrisée. Enfin, il faut sans cesse veiller à la compatibilité technologique de leur mise en œuvre.

## **6.3 CONCEPTION ET OPTIMISATION DES DISPOSITIFS DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE**

La conception des systèmes de conversion dans leur ensemble tend actuellement vers une plus grande intégration fonctionnelle. L'objectif est alors de concevoir des systèmes qui répondent globalement à une fonction, intégrant des convertisseurs électroniques de puissance, des convertisseurs électromécaniques, une électronique de réglage, un système de supervision... Cela oblige à proposer des architectures innovantes pour répondre à ces besoins et à développer des approches de conception plus globales. Les verrous essentiels se situent dans la conception et l'exploitation des matériaux, des composants passifs et actifs sous des contraintes de tension, de densité de courant, de température de plus en plus élevées.

### **Convertisseurs électroniques de puissance**

Dans ce domaine, il s'agit d'améliorer les performances des systèmes de conversion d'énergie à travers l'augmentation des tensions, fréquences et températures de fonction-

nement des composants, mais également à travers une intégration permettant de réduire les tailles, les coûts et les pertes. En terme d'intégration, deux stratégies complémentaires doivent être développées : l'intégration monolithique autour de la fonction interrupteur, et l'intégration hybride 3D à l'échelle du convertisseur :

- Pour le premier niveau l'évolution technologique autour du support silicium permettra le développement d'architectures semi-conductrices susceptibles d'améliorer les performances intrinsèques des composants de puissance intelligents et la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie en intégrant des fonctions de commande et de protection, mais également d'isolation galvanique ou des fonctions passives ou actives de gestion de la thermique. En parallèle, afin de répondre aux nouvelles exigences d'applications en termes de fréquences, température, pertes, il est nécessaire aujourd'hui de développer de nouvelles filières technologiques sur des semi-conducteurs à large bande interdite (grand gap) tels que le carbure de silicium (SiC), le Nitrure de Gallium (GaN), et le diamant.

- Le deuxième niveau d'intégration à l'échelle du convertisseur impose une intégration hybride 3D avec des problématiques relatives aux couplages de phénomènes, à la technologie (en particulier pour l'intégration des passifs), la CEM, la gestion de la thermique... Ce niveau d'intégration nécessite de gros efforts de recherche coordonnés, depuis les niveaux matériaux et composants (actifs et passifs) jusqu'aux architectures de convertisseurs en prenant en compte les problématiques de modélisation et de développement technologiques.

Enfin, l'augmentation des contraintes conduit à un fonctionnement à température ambiante à plus de 300 °C, des tensions de l'ordre de 30 kV par composant, 100 kV pour le convertisseur qui sont à présents des objectifs visés pour des applications dans le domaine du contrôle et de la protection des réseaux de transport et de distribution de l'électricité, de la traction ferroviaire...

## Convertisseurs électromécaniques

Des progrès doivent être accomplis dans le domaine des convertisseurs électromécaniques haute vitesse : Les études menées concernent la recherche de structure d'actionneurs en liaison avec les matériaux capables de supporter les contraintes mécaniques et thermiques et leur alimentation électrique à haute fréquence de découpage.

À ces hautes vitesses peuvent s'ajouter des nécessités de haute température et forte compacité pour des convertisseurs destinés par exemple aux systèmes embarqués (aéronefs, automobile), et pour lesquels s'ajoutent les problématiques de vieillissement et de fiabilité.

Enfin, pour le cas des convertisseurs électromécaniques basse vitesse/fort couple, pour les systèmes éoliens ou pour les moteurs de traction sans réducteur, il est nécessaire d'augmenter les couples massiques pour atteindre, en régime impulsif, la centaine de Nm/kg.

## Systèmes

Dans des contextes particuliers tels que la montée en vitesse et en fréquence, l'optimisation des « éléments » convertisseurs électroniques et électromécaniques est évidemment nécessaire, comme déjà souligné. Mais des avancées potentielles relèvent aussi de l'association judicieuse de ces éléments et de leurs interfaces (filtrages, câblages...) vis-à-vis des compromis à rechercher en terme de masse/compacité, d'efficacité énergétique, de qualité (CEM...). Les problèmes posés sont clairement multiphysiques (magnétique, électrique, thermique, mécanique, mécanique des fluides), multiéchelle de temps (modélisation de phénomènes transitoires très courts qui ont une influence sur le vieillissement à long terme des composants électroniques), multiéchelle dans l'espace. De plus, l'analyse amont de la fiabilité exige une approche de modélisation statistique. Enfin, outre les aspects physiques, la conception fait appel à de multiples autres domaines tels que les modélisations économiques ou d'impact écologique en prenant en

compte les cycles de vie des convertisseurs, en incluant les coûts énergétiques et empreintes environnementales de la réalisation, de l'usage et du recyclage...

## **6.4 TRANSMISSION D'ÉNERGIE ET CEM**

L'interaction entre énergie électrique et énergie électromagnétique peut soit être mise à profit pour la transmission d'énergie par ondes électromagnétiques, soit être subie (Compatibilité électromagnétique).

### **Transmission d'énergie par ondes électromagnétiques HF**

Pour la transmission d'énergie sans contact pour des systèmes nomades, mettant en jeu des niveaux d'énergie très faibles et des distances courtes, deux techniques sont envisageables : transfert proche par induction électromagnétique moyenne fréquence, transfert par faisceau micro-ondes sur des distances plus grandes. Pour l'alimentation de systèmes nomades dans le contexte du développement de l'intelligence ambiante, la transmission par faisceau micro-ondes apparaît plus adaptée du fait de la portée accrue par rapport aux techniques par induction magnétique et de la possibilité d'utiliser des antennes directionnelles. Le verrou principal à lever tient au fait que le rendement global du système doit être maximal, la puissance disponible transportée par une onde rayonnée devant être limitée en intensité pour des raisons normatives de sécurité.

### **CEM**

La pollution électromagnétique engendrée par les dispositifs d'électronique de puissance s'accroît notamment du fait de l'accroissement de leur nombre, de l'augmentation des vitesses de commutation des interrupteurs

de puissance facilitant largement les couplages parasites. Dans ce domaine, les enjeux majeurs concernent la prédiction des émissions conduites et rayonnées, la conception virtuelle avec prise en compte de contraintes CEM et l'optimisation de la solution, les moyens d'essais et mesure et les bancs de caractérisation spécifiques pour la CEM de l'énergie dans les domaines envisagés. En parallèle, des actions de recherche visant à réduire la CEM en électronique de puissance via une action sur les structures de conversion statique doivent être menées : nouvelles structures de conversion statique (utilisation de nouveaux composants, de commandes rapprochées gérant la CEM, de lois de commande minimisant les spectres des grandeurs polluantes), intégration monolithique ou hybride des convertisseurs statiques (pour un confinement structurel des perturbations), mise en œuvre aux meilleurs coûts de solutions actives de filtrage, de compensation et de blindage, et enfin spécification, développement et usage de matériaux mieux adaptés à la gestion de la CEM des systèmes, sous-systèmes et charges finales (actionneurs par exemple).

## **6.5 SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Pour les dispositifs électriques, les axes de recherche dans les prochaines années devraient concerner l'augmentation de leur disponibilité, avec deux grandes directions, la prévention de défaillance qui permet l'optimisation des opérations de maintenance préventive d'une part, et la localisation et l'identification rapide des défaillances et leur évaluation d'autre part.

Il s'agit pour les composants d'électronique de puissance de bien comprendre les mécanismes de vieillissement et de dégradation principalement par l'expérimentation et de développer des modèles permettant d'évaluer leur durée de vie. Pour les constituants des systèmes, il s'agit de rechercher des structures

de convertisseurs qui permettent de pallier la défaillance d'un des constituants, actif ou passif, et de développer des modèles permettant d'obtenir une signature de défaillances, soit par des mesures directes de grandeurs électriques, soit par des mesures indirectes : mesures de champs rayonnés, vibrations mécaniques ou acoustiques. Pour les entraînements à vitesse variable, il convient de profiter des algorithmes sophistiqués de commande des machines électriques pour d'une part détecter une défaillance au niveau d'un élément, et d'autre part mettre en place des commandes redondantes permettant dans certains cas de s'en affranchir.

## **6.6 PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ – SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES AUTONOMES OU SEMI-AUTONOMES**

La production d'électricité pour des systèmes autonomes ou semi-autonomes est en plein développement, qu'il s'agisse de réseaux embarqués ou de production décentralisée (dans les bâtiments par exemple).

Les architectures de puissance, obtenues par association de sources d'énergie (générateurs tournants, piles à combustible...), de dispositifs de stockage et de charges (actionneurs, auxiliaires...) interconnectés par des supports de transmission de l'énergie électrique (réseaux continus, alternatifs) à travers des interfaces électroniques de puissance restent à définir et à optimiser. Les axes de recherche concernent également la gestion dynamique des flux d'énergie dans le système ou dans un sous-ensemble du système en tenant compte des contraintes, limitations, critères privilégiés et scénarios de fonctionnement retenus. Cela inclut la répartition optimale de l'effort énergétique et des sollicitations entre les différentes composantes, le pilotage optimal des charges lors des différentes phases avec anticipation de la demande ou restitution, ainsi que la gestion optimale des actifs et de la continuité de service

à assurer lors de pannes internes ou externes au système.

La nécessité de continuité de service impose le contrôle robuste et performant des convertisseurs interfaçant les différents constituants de la chaîne de puissance de façon à ce qu'ils suivent les consignes fixées par le système de gestion d'énergie en tenant compte des dérives et dispersions paramétriques, des perturbations amont et aval, des charges/sources connectées, etc. La fiabilité de ces dispositifs conduit quant à elle à des recherches sur la détection et la localisation des défaillances affectant les composants de la chaîne de puissance, les capteurs ou les dispositifs de contrôle, sur les processus de reconfiguration exploitant les redondances et la hiérarchie des usages, et enfin sur la mise en œuvre d'outils d'aide à la maintenance...

## **6.7 RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION**

Les activités de recherche dans ce domaine sont liées d'une part aux évolutions récentes du marché de l'électricité (dérégulation) et de son extension, d'autre part aux multiples sources d'énergie renouvelables dont la part de production ne fera que croître, qu'il s'agisse d'éolien ou de solaire.

### **Infrastructures critiques**

Les enjeux principaux sont la maîtrise des congestions et des « blackouts ». Le verrou principal réside dans la dimension mathématique du système étudié (nombre de nœuds, mailles et variables d'état, non linéarités, interactions entre sous-ensembles), ainsi que dans le caractère aléatoire des événements et la diversité des risques.

Dans le domaine de la modélisation et simulation des grands systèmes complexes et hétérogènes, les axes de recherche sont nom-

breux et portent sur la compréhension des interactions composants/systèmes et systèmes de puissance/système de commande, des dynamiques en jeu en vue d'une décomposition optimale en sous-ensembles et d'une réduction de modèles.

Les risques et vulnérabilités restent à évaluer par l'élaboration d'indicateurs macroscopiques temps réel du niveau de sûreté du réseau. Les réseaux étant fortement maillés, des modèles des interdépendances entre réseaux et entre réseau de puissance et système de transmission et de traitement de l'information doivent être développés ainsi que des modèles d'analyse des phénomènes de cascade.

Il convient également de tout mettre en œuvre pour faire face à d'éventuels problèmes de congestions par la mise en place d'outils de prévision et d'analyse qui devraient déboucher sur des méthodes de gestion des congestions par reconfiguration des réseaux, re-répartition de la production ou délestage de charge.

### **Intégration du renouvelable au réseau de distribution et stockage**

Des injections de puissance de caractéristiques bien diverses et la gestion des intermittences de production sont le principal enjeu de l'insertion de la production décentralisée. Celle-ci n'est envisageable qu'à la condition de développer le stockage à grande échelle. Ceci pose en premier lieu la question du choix des technologies de stockage (dimensionnement, contrôle, temps de réponse). Le second enjeu est lié à l'intégration du stockage dans la gestion du réseau. L'utilisation du stockage est conditionnée à sa participation au réglage de l'équilibre production – consommation dans une plage de fonctionnement élargie. Le troisième enjeu est lié à la valorisation économique du stockage. Le coût de l'utilisation d'une technologie de stockage, mais également la valeur ajoutée par les fonctions ainsi apportées, doivent être estimés de manière à pouvoir situer l'intérêt économique de cette solution.

## **6.8 SANTÉ-ENVIRONNEMENT**

L'énergie électrique et l'électromagnétisme sont largement impliqués dans le domaine de la santé et de l'environnement, compris ici en termes de domaines applicatifs, et qui sont loin d'être disjoints. La réponse aux problématiques posées dans ces deux domaines impose de mettre en synergie des compétences très transversales allant du génie électrique au génie des procédés en passant par les domaines des mathématiques appliquées, de la physique, de la chimie, de la biologie et de la santé.

Les défis propres au domaine du Génie électrique concernent principalement 3 domaines :

- L'interaction champs électromagnétiques/vivant.
- L'interaction plasma-décharge/matière (inerte ou vivante)
- L'impact des propres technologies du Génie Electrique sur l'environnement.

### **Interaction champs électromagnétiques/vivant**

Depuis longtemps les applications en diagnostic médical et en thérapie impliquent plusieurs communautés scientifiques. Elles sont cependant en évolution permanente, et l'optimisation des procédés existants ou la mise au point de nouveaux moyens thérapeutiques passe notamment par une maîtrise des interactions entre champs électriques et systèmes biologiques dans lequel le génie électrique a toute sa place. De nombreuses questions restent ouvertes dans le domaine de l'interaction champs électromagnétiques/vivant. Les applications dépassent le cadre de la santé et peuvent concerner des aspects environnementaux à fort enjeux lorsque les cellules considérées sont des microorganismes bactériens (exemple la dépollution de l'eau par impulsion haute tension).

Le problème des effets sanitaires potentiels de l'exposition involontaire des êtres

humains aux champs relève de la même problématique scientifique pour laquelle subsistent actuellement plusieurs verrous :

- le modèle électromagnétique et éventuellement multiphysique en tant que tel. En effet, l'action des champs électromagnétiques se situe au niveau de la cellule, voire des constituants de la cellule, alors que les champs sont appliqués à des niveaux supérieurs : tissus, organe voire organisme entier.

- la vérification expérimentale *in vivo* des résultats de simulations. Par exemple, la mesure des courants induits basses fréquences est actuellement impossible, et la mesure des échauffements en hautes fréquences très difficile.

Parallèlement aux activités de modélisation électromagnétique à l'échelle du corps humain, une partie croissante de chercheurs en Génie électrique s'investit dans le développement des biomicrosystèmes (voir partie correspondante du rapport) impliquant l'électromagnétisme, la biologie, la microfluidique, les matériaux, et la physique.

### **Interaction plasma-décharge/ matière (inerte ou vivante)**

Les plasmas ont des champs d'application qui couvrent aussi bien des aspects environnementaux (dépollution de gaz de combustion, élimination de COV – Composés organiques – ...) que des aspects de santé (destruction de microorganismes dans les effluents liquides, de biofilms bactériens...). L'amélioration de l'efficacité fonctionnelle et énergétique des procédés de traitement basés sur l'utilisation des plasmas pose de nombreux défis en termes de connaissances fondamentales et de développements technologiques :

- La compréhension des mécanismes de destruction par plasma des microorganismes planctoniques ou structurés en biofilm (stérilisation et décontamination).

- Dans le cas des traitements de dépollution en volume par procédés plasmas, de nombreuses questions scientifiques restent en suspens telles que la caractérisation complète et le contrôle des sous produits, ainsi que la compréhension locale des couplages physico-chimiques conduisant à la destruction des polluants avec ou sans catalyseurs.

- Le design des réacteurs en fonction des espèces à traiter et des conditions de fonctionnement.

- Les changements d'échelle entre des réacteurs de laboratoire fonctionnant à quelques litres par minute vers des réacteurs industriels fonctionnant à plusieurs mètres cubes par minute.

- L'élaboration de matériaux permettant de garantir des durées de vie conséquentes.

### **Impact des propres technologies du Génie Électrique sur l'environnement**

Cette préoccupation est de plus en plus présente en ingénierie. Elle conduit à mettre en place des démarches globales de conception visant à minimiser l'impact global des systèmes électriques tout au long de leur durée de vie. Outre l'efficacité énergétique, un des axes de développement est de mettre au point des matériaux à faible impact environnemental. On peut citer par exemple les études visant à remplacer le SF<sub>6</sub> (gaz à effet de serre) par des mélanges gazeux à base d'azote ou dans certaines applications par des liquides isolants biodégradables.

---

#### **Note**

(1) ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net>



# 09

---

## **INGÉNIERIE DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES, MÉCANIQUE DES SOLIDES, ACOUSTIQUE**

### *Président*

Djimédo KONDO

### *Membres de la section*

Piotr BREITKOPF

Robert CHARLIER

Paul CRISTINI

Valérie DEPLANO

Bertrand DUBUS

Joseph GRIL

Thierry LE MOGNE

Frédéric LEBON

Nathalie MAUREL

Nicolas MOES

Laurent ORGEAS

Vincent PAGNEUX

Étienne PATOOR

Sylvie POMMIER

Claire PRADA

Edgar RAUCH

Jean-Jacques SINOU

Frédéric VALES

Claude VERDIER

Les disciplines représentées dans la section 09 sont à la fois des disciplines de savoir, et des disciplines de l'ingénierie. On les retrouve aussi bien dans les activités de génération de connaissances de base, que dans la démarche de mise en œuvre de ces connaissances dans des réalisations concrètes.

Ce rapport est organisé comme suit. Dans un premier temps, différentes thématiques disciplinaires de la section sont passées en revue avec la préoccupation d'extraire quelques faits marquants, de préciser quelques enjeux scientifiques pour les cinq prochaines années et, enfin, de proposer des recommandations. Dans un second temps, des éléments complémentaires plus transversaux sont apportés en les déclinant sur la multi-disciplinarité, l'impact sociétal des disciplines et les relations avec l'industrie.

### **1 – ACOUSTIQUE**

L'acoustique est la science de la vibration de la matière et de la propagation de cette vibration sous la forme d'ondes. Elle s'appuie sur un socle scientifique et technique très

large, multidisciplinaire, associant étroitement aspects fondamentaux et appliqués. L'acoustique peut être structurée en deux domaines principaux : le premier centré sur la perception des sons par les êtres vivants avec des thématiques comme l'audition, la parole, la psychoacoustique, l'acoustique musicale, la vibro-acoustique, l'aéroacoustique, l'acoustique environnementale et la bioacoustique ; le second concerné par l'exploitation des ondes acoustiques à des fins d'ingénierie sans lien avec la perception sonore (imagerie, contrôle non destructif, sismique, acoustique sous-marine...). La frontière entre « acoustique sonore et perceptive » d'une part et « ingénierie des ondes acoustiques » reste cependant perméable et source d'interdisciplinarité.

## **1.1 ACOUSTIQUE SONORE ET PERCEPTIVE**

L'acoustique sonore et perceptive a une grande importance dans la vie quotidienne de l'être humain comme vecteur d'expression, de communication et de culture. Lui sont naturellement associées des questions sociétales fondamentales :

- les problèmes de santé publique que constituent la malentendance, la surdité et autres pathologies de l'audition ;
- les nuisances sonores liées en particulier aux transports dans un environnement urbain de densité et d'activité toujours croissantes ;
- la question naissante de l'effet du bruit anthropogénique sur le comportement animal et de ses conséquences sur la biodiversité.

## **1.2 CARACTÉRISER LES SOURCES ET LA PROPAGATION DU BRUIT**

De nombreuses sources de bruit dans les transports font intervenir des phénomènes non

linéaires et/ou chaotiques associés à un écoulement, un contact ou un frottement : bruit de turbulence et bang sonique en aéronautique, contacts pneumatique-chaussée ou roue-rail, crissement des freins... La modélisation numérique et la caractérisation de ces phénomènes a connu d'importantes avancées comme le développement de la modélisation directe du bruit rayonné par des écoulements turbulents ou la mise en œuvre de méthodes laser (anémométrie laser à effet doppler, vélocimétrie par image de particules) pour la caractérisation des champs acoustiques. Ces résultats alimentent les travaux sur le contrôle du bruit à la source qui peuvent être de type passif, actif ou mixte.

La prévision des niveaux sonores implique également la caractérisation sur une large bande de fréquence de la propagation du bruit en incluant les processus de diffraction, de diffusion et d'absorption par des obstacles, de réflexion et d'absorption par des sols hétérogènes, de réfraction et de diffusion en présence de phénomènes micrométéorologiques...

Les travaux sur cette thématique sont pour une part importante conduits dans le cadre du GDR 2493 « Bruit des transports » qui doit se poursuivre sous la forme d'un nouveau GDR orienté sur l'environnement urbain : « Ville silencieuse durable ».

## **1.3 COMPRENDRE LES LIENS ENTRE GRANDEURS ACOUSTIQUES, MÉCANISMES PHYSIOLOGIQUES DE L'AUDITION ET SENSATION PERÇUE EN SITUATIONS COMPLEXES**

Si le mécanisme de perception de certains attributs élémentaires du son (niveau sonore, hauteur tonale) est aujourd'hui assez bien compris dans un environnement où les stimuli sont parfaitement contrôlés, de nombreuses questions restent ouvertes dans le cas de sons ayant une structure temporelle complexe. La

sonie qui quantifie la perception du bruit ou le timbre qui caractérise un son complexe font l'objet de nombreux travaux de nature très interdisciplinaire (acoustique, biologie, neurosciences) qui s'appuient sur les récentes avancées en synthèse de champ sonore et en imagerie cérébrale fonctionnelle. L'étape suivante consiste à tenter d'établir une relation directe entre les propriétés de vibration et de rayonnement des sources de son ou de bruit et les sensations perçues. Il s'agit là d'une thématique riche en applications : facture instrumentale, environnements urbains, qualité sonore de produits manufacturés...

## **1.4 MODÉLISER LES SYSTÈMES AUDITIFS ET VOCAUX**

La parole est une activité propre à l'homme, sans doute l'une des plus importantes. Sa production et sa perception font intervenir des mécanismes vocaux et auditifs spécifiques à notre espèce. Il s'agit de phénomènes d'une grande complexité dans lesquels l'acoustique joue un rôle important en interaction avec de nombreuses autres disciplines (physiologie, mécanique des fluides, biomécanique, neurosciences, linguistique, informatique). La description fine du fonctionnement de l'audition ou de la voix, nécessaire à la description des physio-pathologies et à l'amélioration des prothèses auditives et vocales, a engendré une évolution vers des modèles numériques tridimensionnels. Ceux-ci restent pour l'instant, limités à des mécanismes partiels et souffrent d'une connaissance encore insuffisante de la biomécanique des tissus vivants.

## **1.5 INGÉNIERIE DES ONDES ACOUSTIQUES**

En ingénierie, l'onde acoustique est principalement un outil d'exploration et de

caractérisation de la matière (échographie acoustique incluant l'évaluation et le contrôle non destructifs, le sonar et l'océanographie, la sismique...), mais elle peut également servir à transmettre une information (téléphonie sous-marine...) ou à transformer la matière (sonochimie, soin par hyperthermie...).

L'échographie au sens large est un sujet d'importance économique dans les secteurs du transport, du nucléaire, du médical, où la vie des individus est le critère prépondérant par rapport à celui du coût et où un nombre croissant de pièces et de structures doit être contrôlé en production, en cours d'utilisation ou lors d'opérations de maintenance. La dynamique insufflée par le GDR 2501 « Ultrasons » (devenu franco-anglais) a été particulièrement positive pour le développement de ces thématiques.

L'autre volet important, impliquant des ondes de plus basse fréquence, concerne la caractérisation ou la surveillance des éléments constitutifs de la planète (terre, mer, atmosphère). Les évolutions majeures en ingénierie des ondes acoustique (à l'exception de l'imagerie traitée par ailleurs) sont décrites ci-après des infrasons aux hypersons.

## **1.6 SONDER ET SURVEILLER LA PLANÈTE**

De nombreuses expériences ont montré que les ondes acoustiques pouvaient être utilisées à des fins de caractérisation ou de surveillance après propagation via le sol, les océans ou l'atmosphère sur des distances de plusieurs centaines à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Les applications sont nombreuses et très actuelles : thermométrie acoustique des océans, détection d'essais nucléaires, surveillance de l'activité volcanique... Ce regain d'intérêt pour les infrasons ou les sons de très basse fréquence pose des défis spécifiques comme la modélisation de la propagation acoustique sur de très grandes distances en environnement incertain, la conception de capteurs et de sources très basse fréquence

ou le développement de méthodes de traitement et d'analyse des signaux adaptées. À une échelle plus locale, l'essentiel des efforts porte sur la caractérisation acoustique des fonds marins, activité bien établie soutenue par la défense et par l'industrie pétrolière.

## **1.7 RÉCUPÉRER DE L'ÉNERGIE ET REFROIDIR AVEC DES ONDES ACOUSTIQUES**

Les machines thermoacoustiques (moteurs et pompes à chaleur) sont susceptibles d'apporter des réponses à certains problèmes liés au contexte de changements climatiques et de décroissance des ressources en énergie fossile : génération d'électricité à partir d'une source de chaleur renouvelable, récupération de l'énergie perdue sous forme de chaleur, réfrigération « propre »... Sous l'impulsion du GDR 3058 « Thermoacoustique », la recherche française en thermoacoustique se développe et se structure avec pour objectif l'amélioration des performances de ces machines.

Les études menées abordent des aspects à la fois fondamentaux (description des phénomènes complexes se développant dans ces machines) et technologiques (développement de machines opérationnelles).

## **1.8 DÉVELOPPER UN CONTRÔLE SANTÉ INTÉGRÉ**

Pour augmenter la sécurité et réduire les coûts en évitant l'immobilisation et le démontage partiel des structures à tester, le contrôle santé intégré repose sur un réseau d'actionneurs/capteurs implanté au sein des structures lors de leur fabrication. Celui-ci constitue un système permanent d'évaluation non destructive qui permet de délivrer à tout instant un diagnostic santé. Cette méthode, active ou passive, suppose une connaissance fine de la pro-

pagation des ondes ultrasonores guidées dans les structures réelles et la mise en œuvre de méthodes innovantes de traitement des réseaux de capteurs (décomposition de l'opérateur de retournement temporel, corrélation de champ diffus...) que tendent également à exploiter les méthodes plus traditionnelles de contrôle non destructif.

## **1.9 GAGNER EN SENSIBILITÉ GRÂCE AUX EFFETS NON LINÉAIRES**

Le caractère localisé des non-linéarités des défauts dans le matériaux industriels (béton, métaux et alliages...) fait des phénomènes acoustiques non linéaires des candidats privilégiés pour détecter et caractériser l'endommagement de ces matériaux par fissuration, délamination, décollement, corrosion, fatigue... Les caractéristiques acoustiques non linéaires s'avèrent beaucoup plus sensibles à l'endommagement que les paramètres linéaires. La transposition de ces techniques de laboratoire vers l'industrie constitue le défi actuel de cette thématique.

## **1.10 SOIGNER AVEC DES ULTRASONS**

L'effet des ultrasons sur les tissus vivants est à l'origine d'un grand nombre de techniques médicales interventionnelles en évolution rapide : les ultrasons focalisés à haute intensité (HIFU) pour l'ablation de tumeurs par hyperthermie, la thrombolyse et l'homéostasie ; la biothérapie assistée par ultrasons pour la délivrance ciblée de médicaments, la thérapie génique ou la réparation de fractures osseuses.

La nécessité de décrire l'interaction complexe onde-matière vivante met également l'acoustique non linéaire au cœur de cette thématique.

## 1.11 EXPLORER LA MATIÈRE AUX PETITES ÉCHELLES

La génération et la détection d'ondes ultrasonores par lasers picoseconde (acoustique nanoseconde) ou femtoseconde (acoustique picoseconde) offrent une méthode unique de caractérisation de la matière aux échelles micro-métriques et nanométriques. L'industrie micro-électronique constitue le principal domaine d'application. Les travaux émergents sur ce sujet abordent la caractérisation de nano-objets ou l'imagerie très haute résolution des milieux biologiques.

Pour compléter la description thématique et qualitative qui précède, la situation de l'acoustique en France peut être analysée à la lumière de données statistiques récentes issues du livre blanc de l'acoustique édité par la Société Française d'Acoustique. Sur la période 2006-2009, le pourcentage d'articles d'origine française est de 8,7% dans le *Journal of the Acoustical Society of America* et de 7,8% dans l'ensemble des 26 revues d'acoustique référencées dans le *Web of Science*. Ces chiffres, comparable à ceux de la physique, montrent que la situation de l'acoustique est globalement satisfaisante pour autant que l'on admette la pertinence d'un critère fondé sur le nombre de publications. Si l'on pousse l'analyse en distinguant les sous-disciplines, on peut identifier les sous-disciplines dont le pourcentage de publication d'origine française est notablement supérieur à la moyenne de la discipline (acoustique linéaire générale, acoustique non linéaire, acoustique ultrasonore, vibroacoustique et bruit, acoustique musicale) et celles dont le pourcentage est notablement inférieur (audition dans son ensemble physiologique ou psychologique, acoustique sous-marine, bioacoustique qui s'intéresse à l'acoustique des animaux).

Il est préoccupant que l'audition, qui relève d'un problème sociétal susceptible de s'accroître avec le vieillissement de la population et le manque de sensibilisation des plus jeunes, fasse l'objet de peu de travaux scienti-

fiques en France. La difficulté à conduire une recherche fortement interdisciplinaire dans un pays où les grandes disciplines structurent fortement la formation et l'organisation scientifique peut-être l'une des raisons de ce désintérêt.

Le cas de l'acoustique sous-marine est différent. Suite au retrait massif des financements militaires dans les années 90, le secteur académique s'est considérablement réduit au point de mettre en jeu la pérennité d'un certain nombre de compétences acquises. Il est important que les pouvoirs publics mesurent l'importance de conserver cette spécialité en France, en raison des nombreuses applications liées à l'environnement et l'énergie.

La bioacoustique est une recherche fondamentale presque absente de France. Le plan stratégique du CNRS à 2020 prévoit les études sur le développement des êtres vivants. La production du son et l'audition sont des aspects de la biologie des animaux qui ne peuvent être ignorés, en lien avec le bruit anthropogénique et ses conséquences sur la bio-diversité.

Enfin, il faut noter que l'audition et l'acoustique sous-marine souffrent d'un manque de coordination et de structuration au niveau national. Le CNRS a sans aucun doute un rôle à jouer pour susciter, soutenir et structurer les initiatives collectives sur ces thématiques.

## 2 – MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Les travaux sur les structures et sur les matériaux (bois, métal, polymère, béton...) sont de plus en plus intimement liés dans la mesure où le comportement mécanique d'un objet, qu'il s'agisse d'un micro mécanisme ou d'un bâtiment, dépendra tout à la fois de l'amplitude des sollicitations transmises par la structure et de la capacité des matériaux utilisés à supporter ces charges.

Les études menées dans ce domaine par les laboratoires de la section sont en phase avec les demandes sociétales. Il s'agit aujourd'hui de concevoir ou d'analyser des matériaux ou multi-matériaux de structures et/ou multifonctionnels qui répondent aux impératifs de secteurs industriels majeurs tels que l'énergie, le transport, l'environnement, la santé et le génie civil. Les exigences sont d'assurer la durabilité et la fiabilité des produits ou des structures tout en assurant une « conception verte » en intégrant notamment l'ensemble de la chaîne « de vie » des matériaux, de leur élaboration jusqu'à leur fin de vie.

Si les travaux sont généralement identifiés par leurs particularités et notamment les spécificités des matériaux étudiés (polycristaux, amorphes, multiphasés, milieux divisés...) les concepts et les méthodes présentent de très fortes potentialités de transversalités. Une des forces de la communauté mécanicienne est de ne pas être cloisonnée par matériaux cibles.

Concernant les sollicitations à considérer, elles sont variées et toujours plus complexes. Et il importe de prendre en compte le comportement mécanique sur des échelles d'espace variées et des échelles de temps très étendues allant de celles très courtes relatives aux sollicitations dynamiques (vibrations et séismes) à celles caractéristiques des géomatériaux. De même les modes de déformation sont sensiblement différents intégrant les faibles voire très faibles déformations (domaine élastique ou microplastique) et les très grandes déformations (élastomères, tissus mous, nouveaux procédés de mise en forme), ainsi que différents couplages dus à des sollicitations thermomécaniques, hydromécaniques ou chimio-mécaniques, ou encore au vieillissement et l'altération...

À cette fin, les recherches conduites s'appuient sur une démarche alliant, d'une part, les observations de plus en plus fines des microstructures et, d'autre part, l'analyse, fréquemment théorique et/ou numérique, ainsi que l'interprétation des micro-mécanismes de déformation. S'est fait jour depuis quelques années une volonté manifeste d'enrichir les modèles de comportement macro-

scopique ou des approches multi-échelles (théoriques et/ou numériques) en s'appuyant sur les physiques en jeu aux échelles pertinentes.

Ainsi, la prise en compte des sollicitations multiphysiques, des couplages avec les transferts fluide dans des milieux saturé ou non saturé, avec la température, la chimie ou la biologie, a fortement progressé grâce aux travaux de nombreux laboratoires relevant de la section. D'autre part, on notera que les moyens de mesures ont considérablement évolué au cours des dernières années. Par exemple, les mesures de déplacement ou de champs qui étaient pratiquées de manière quasi artisanale et laborieuse voici près de 30 ans sont aujourd'hui basées sur une prise d'images 2D ou 3D (tomographie notamment) avec des outils en lumière visible, en rayons X, en infrarouges, etc., associée à la corrélation d'images ; ceci permet notamment d'accéder aux champs de déformation en tout point des échantillons. Ces techniques sont pratiquées aujourd'hui par de nombreux laboratoires. On peut espérer voir émerger demain de puissants outils d'observations fines sur des ouvrages de grande taille (un pont, une aile d'avion, une fondation, une structure en service...).

Outre ces développements, la mécanique des matériaux se trouve intimement liée à des recherches menées en science des matériaux et plus spécifiquement en métallurgie. Les travaux associés à la métallurgie conservent un niveau d'excellence mondiale qui est partie prenante dans l'essentiel des développements des secteurs majeurs de l'industrie et ce malgré la dispersion à la fois des centres de décisions et des sites de productions hors Europe. En particulier, ils ont aujourd'hui dépassé le stade de l'approche explicative pour proposer des démarches prédictives et tendent vers la conception de matériaux « sur mesure » pour répondre aux demandes de plus en plus contraignantes de propriétés spécifiques pour des usages inédits et exigeants. Il est par exemple souvent question d'alléger les structures dans le transport, de stabiliser dans le temps et fiabiliser les matériaux utilisés dans le secteur de l'énergie, de diminuer, à proprié-

tés physique et mécanique constantes, la taille des objets produits dans le secteur de la microélectronique, etc.

Les enjeux des prochaines années portent également sur la prise en compte de plus en plus fine de couplages multiphysiques (e.g. : perméabilité-mécanique) en mettant à profit diverses techniques de changement d'échelle. Si beaucoup d'espoirs sont fondés sur ces dernières méthodes, il est peu probable qu'elles permettent dans un délai court de traiter tous les problèmes posés, ce qui justifie de maintenir un dialogue fort entre ces méthodes et le développement d'approches phénoménologiques, éventuellement enrichies.

De nombreuses questions restent très ouvertes notamment autour de la fissuration/rupture dont il est bien connu qu'elle dépend de l'échelle à laquelle on observe les phénomènes. Des efforts notables de recherche théorique et numérique sont encore nécessaires dans ce domaine. Les contributions récentes de l'École française de mécanique, tant par des approches variationnelles de la fissuration tout à fait originales que par le développement de modèles constitutifs régularisés sont importantes. Elles laissent espérer des avancées notables pour la description de la transition des modes de déformation continus vers la rupture.

Une des difficultés liées aux évolutions récentes concerne la diversification des matériaux. Celle-ci provient des possibilités d'élaborer de nouveaux matériaux à partir de constituants usuels, mais également de la nécessité d'optimiser les propriétés d'usage. Ainsi, au delà des composites à matrice métallique ou polymère qui font dorénavant partie du paysage, voit-on émerger des composites verts, des nanocomposites, des matériaux « intelligents » (matériaux biomimétiques, alliages/polymères à mémoire de forme, matériaux piézo-électriques, micro/mésosstructures adaptatives...), des matériaux architecturés (renforts nanométriques/millimétriques, cellulaires, mousses, milieux poreux, granulaires, fibreux...), sans oublier les biomatériaux ou les tissus vivants. Ces « nouveaux » matériaux, le plus souvent « porteurs », suscitent de nouvelles probléma-

tiques de fond capables de faire progresser les connaissances mais également les méthodes et les outils en mécanique des matériaux.

Enfin, il faut constater qu'il se crée de plus en plus un continuum entre Ingénierie des matériaux, Ingénierie des structures et mécanique des solides. Cette tendance doit beaucoup aux travaux expérimentaux sur l'analyse de champs mécaniques qui fait l'objet du paragraphe suivant.

### 3 – IMAGERIE ET MESURE DE CHAMPS

L'imagerie, accompagnée de ses chaînes de « post-traitement », comme par exemple l'analyse d'images et les techniques mesures de champs, se positionne aujourd'hui comme un moyen incontournable dans la section, que ce soit pour répondre à des problématiques applicatives, comme le Contrôle Non Destructif (dans l'industrie, le génie civil, le biomédical...) ou bien encore pour observer et décrire les sous-structures, et leurs mécanismes de déformation, dans les milieux hétérogènes sur lesquels les chercheurs de la section 09 se penchent (matériaux naturels, manufacturés, géomatériaux, structures du génie civil, milieux vivants...). Elle contribue ainsi, et de plus en plus significativement, à la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques et mécaniques de ces milieux.

Dans cette optique, de multiples techniques d'imagerie sont développées et mises en œuvre par les chercheurs expérimentateurs de la section 09. Pour certaines techniques, ces chercheurs se positionnent même comme des acteurs principaux de leur développement : c'est le cas des techniques d'imagerie émergentes basées sur la propagation d'ondes élastiques. Ils sont également fortement impliqués dans le développement d'essais (micro)mécaniques avec observations in situ couplés à des mesures de champs, cinématiques et/ou thermiques.

D'une manière générale, les tendances qui se dessinent sont d'aller vers :

- de plus en plus d'imagerie 3D (microscopie confocale, IRM, microtomographies à rayons X – dont l'utilisation en mécanique des (géo)matériaux a été initiée par les chercheurs de la section –, optique, acoustique, par résistivité électrique...),

- les échelles d'observation de plus en plus fines (nano-tomographie à rayons X ou sous ESEM, microscopie à transmission, microscopie à force atomique, sonde atomique 3D, imagerie par enlèvement de couches MEB-FIB),

- les structures pour leur contrôle en service (CND) mais également lors de leur certification (dans l'aéronautique par exemple), voire lors de leur conception (utilisation de démonstrateurs) où différents moyens de mesure peuvent être mis en œuvre,

- les couplages entre différentes méthodes (observations de surface dans le visible et l'infrarouge, DRX, microtomographie à rayons X en modes d'absorption et de diffraction...).

Une autre tendance très nettement renforcée ces derniers temps est la volonté accrue de voir bouger les milieux étudiés, de plus en plus vite (dynamique rapide), le cas échéant dans des conditions d'observation de plus en plus sévères (par exemple lors de l'usinage des métaux ou lors d'essais faits pour des applications militaires).

### **3.1 IMAGERIE PAR PROPAGATION D'ONDES ÉLASTIQUE (1)**

Utilisée depuis longtemps en échographie médicale, l'imagerie ultrasonore multi-éléments se développe de façon significative pour le contrôle non destructif des matériaux, notamment avec l'utilisation des ondes de cisaillement.

De nombreux algorithmes de traitement des signaux multiélément, en rupture avec

l'échographie conventionnelle, sont développés pour le CND comme pour l'acoustique sous marine et le médical.

Pour l'étude des tissus vivants, l'élastographie transitoire est une technique récente en plein essor qui exploite également les possibilités des multiéléments. Pour ce sujet au cœur de la section 09, il s'agit d'engendrer des ondes de cisaillement au sein des tissus par pression de radiation acoustique, d'observer leur propagation à l'aide des ondes longitudinales en utilisant une technique d'imagerie ultra-rapide, puis par résolution du problème inverse de réaliser des cartes de propriétés élastiques. Les ondes de cisaillement peuvent également être observées par IRM ou par opto-élastographie. Ces méthodes ouvrent de nombreuses perspectives dans l'étude des propriétés viscoélastiques des tissus débouchant notamment sur des applications au diagnostic du cancer.

À souligner également, le développement d'autres méthodes mixtes couplant ondes optiques et ondes élastiques : l'imagerie acousto-optique et l'imagerie photo-acoustique.

Enfin, l'imagerie passive par corrélation de bruit semble une piste prometteuse déjà initiée en acoustique sous-marine et en géophysique ; elle est aussi étudiée dans les microsystèmes intégrés pour l'inspection de structures.

L'imagerie, qu'elle soit « tout acoustique » ou couplée « acoustique – optique », est ainsi une thématique majeure de l'acoustique française, en forte évolution et répondant à des besoins sociétaux importants.

### **3.2 ESSAIS IN SITU ET MESURES DE CHAMPS**

Par la réalisation d'essais (micro)mécaniques couplés d'une part aux techniques d'imagerie sus citées et d'autre part à des méthodes de mesures de champs cinématiques (principalement par corrélation d'images 2D,

3D surfacique ou 3D volumique) et/ou thermiques (thermographie infrarouge) et/ou de déformations élastiques de microstructures (EBSD, DRX, DCT), la mécanique expérimentale des milieux hétérogènes connaît à l'heure actuelle une véritable révolution. Il est important de souligner que cette dernière est en grande partie conduite par les équipes de chercheurs de la section, particulièrement actifs (notamment grâce au GDR CNRS 2519 « mesure de champs et identification en mécanique des solides »). Le positionnement de ces travaux au niveau international est très bon, et les efforts de recherche dans ce secteur doivent être poursuivis et soutenus. En effet, le développement et la diffusion de ces méthodes, qui peuvent parfois faire appel (tendance actuelle, originale et judicieuse) à des méthodes avancées de mécanique numérique (X-FEM par exemple pour analyser les champs de déplacement discontinus) et qui sont en particulier utilisées pour analyser les résultats de l'imagerie 3D citée précédemment, sont pertinents puisqu'ils permettent aujourd'hui :

- de définir de nouvelles stratégies pour le pilotage d'essais mécaniques en vue de reproduire des situations plus proches de l'utilisation finale des matériaux et des structures,

- de concevoir de nouveaux essais permettant l'identification robuste de modèles de comportement et de rupture,

- d'étudier finement et à différentes échelles des mécanismes de déformation dans des systèmes complexes : endommagement et fissuration (céramiques, composites, matériaux du génie civil), bandes de cisaillement (rhéologie des milieux granulaires et suspensions concentrées), plasticité (poly)cristalline, effet Portevin Le Chatelier, transformation de phases et couplages thermomécaniques (alliages métalliques, alliages à mémoire de forme), instabilités (par exemple, flambement de sousstructures architecturées, de tissus vivants)...

- de valider/invalider des modèles et de revisiter ainsi les concepts des théories usuelles de la thermodynamique des milieux continus, standards ou généralisés, ou bien encore ceux de la mécanique des systèmes discrets.

## 4 – MULTI-ÉCHELLE ET MULTI-PHYSIQUE

Même si les approches multi-échelles et multi-physiques ont été déjà mentionnées à plusieurs reprises dans ce rapport et dans différents secteurs disciplinaires, il convient de souligner qu'un corpus de méthodes propres à ces problématiques s'est développé de manière significative ces dernières années. En particulier, le domaine des régimes non linéaires (plasticité, élastoviscoplasticité, endommagement, couplages thermo-hydrémécaniques, etc.), réputé jusque là ardu et presque hors d'atteinte, de même que l'investigation des très petites échelles connaissent aujourd'hui des avancées remarquables, pour la plupart trans-disciplinaires. Ceci n'a été possible que grâce à la conjonction d'approches expérimentales innovantes, de méthodes théoriques ou variationnelles originales et de méthodes numériques permettant en notamment une analyse fine de l'hétérogénéité des champs mécaniques (Éléments Finis ou Transformée de Fourier Rapide (FFT)).

Parmi les nombreux points qui font l'objet d'efforts remarquables de recherches et qui connaîtront probablement des développements importants dans les prochaines années, on notera :

- La caractérisation expérimentale des couplages multiphysiques : thermomécanique, hydrémécanique, couplages chimiomécaniques (géomatériaux, milieux vivants...), piézoélectricité, magnéto élasticité, etc. Les progrès attendus dans ces domaines proviendront non seulement de développements d'expériences fines adaptées au type de couplage en jeu, mais également de la mise au point de capteurs appropriés et de grande précision. Les méthodes d'imagerie et de mesures de champs, déjà évoquées, devront également jouer un rôle important dans l'étude de ces phénomènes couplés, par exemple pour caractériser l'évolution de fronts de dissolution lors de couplages mécano-chimiques.

- La prise en compte des non linéarités comportementales des matériaux dans les

méthodes de changement d'échelle. Ce domaine de recherche mobilise, à juste titre, de nombreuses équipes dont l'activité scientifique se place au plus haut niveau international. Ceci se traduit notamment par un foisonnement de travaux de modélisations théoriques de qualité, très soutenus par des outils numériques innovants (éléments finis étendus, FFT, techniques de réduction de modèles). Les approches par champs de transformations, le calcul multiéchelle de microstructures ou calculs complets (aussi bien pour des composites que pour des milieux polycristallins) sont des exemples de ces développements. Les récentes modélisations s'appuyant sur des approches incrémentales variationnelles constituent également une voie très prometteuse, indispensable pour investiguer les matériaux hétérogènes dissipatifs dont la modélisation du comportement local nécessite plusieurs potentiels. Un sujet connexe à ces problématiques est la caractérisation et la prise en compte des hétérogénéités des champs intraphase.

– L'étude des phénomènes d'endommagement/fatigue et rupture en Micromécanique des matériaux qui reste encore difficile à aborder, en raison des évolutions complexes de microstructures que cela induit. La formulation de modèles d'endommagement régularisés à l'aide des méthodes d'homogénéisation est souhaitable. Elle pourrait fournir une base précieuse aux différentes modélisations phénoménologiques disponibles.

– La dynamique des dislocations pour la plasticité. Une tendance forte qui semble se dégager dans ce domaine est l'analyse des comportements mécaniques aux très petites échelles ainsi que l'étude des liens entre le discret et le continu en mécanique des matériaux. Ce dernier aspect intéresse également les milieux granulaires.

– La modélisation multiéchelle des couplages multiphysiques, avec des développements importants en géomécanique, mais également en physique et mécanique des polymères. Les simulations de procédés ou de la mise en forme constituent des enjeux scienti-

fiques et industriels majeurs pour lesquels les évolutions microstructurales au cours des procédés doivent être prédites avec précision.

– La prise en compte de la variabilité, en particulier dans les matériaux hétérogènes. À ce titre, les méthodes d'homogénéisation pourraient bénéficier des progrès récents en mécanique stochastique.

– La descente dans les très petites échelles, principalement motivée par l'émergence des matériaux nanostructurés. Elle incite à travailler de plus en plus avec les physiciens et les chimistes. Car de nouveaux concepts doivent être introduits dans les approches multi-échelles pour rendre compte de phénomènes induits par la considération d'objets dont au moins une dimension est nanoscopique (par exemple, effet de taille d'inclusions dans les nanocomposites). On assiste à un essor de la mécanique des surfaces/interfaces, déjà présente dans les problèmes de tribologie ou même de structures, mais dont l'incorporation dans les approches multi-échelle est un enjeu scientifique de grand intérêt.

## 5 – MÉCANIQUE POUR LE VIVANT

Les recherches en biomécanique, ou plus largement en mécanique pour le vivant, bénéficient du large spectre des compétences théoriques, numériques et expérimentales de la section 09 et ce quelles que soient les échelles spatiotemporelles considérées. Basées sur le développement de nouveaux modèles, méthodes et approches «mécaniques», ces recherches permettent de mieux décrire, comprendre et par suite appréhender la complexité des fonctionnements et des dysfonctionnements de systèmes biologiques humain, animal et végétal.

## 5.1 FRONTIÈRES DISCIPLINAIRES, FINALITÉS ET OBJETS D'ÉTUDE

Les relations entre la mécanique et la biologie sont diverses, selon la finalité de la recherche et les frontières disciplinaires associées. L'application pour la santé humaine est largement dominante ; l'objectif est principalement la prévention, le diagnostic et la thérapie des dysfonctionnements. S'y rattache une partie des recherches sur l'animal, que ce soit comme modèle pour l'humain ou pour des applications vétérinaires. Les applications agroalimentaires, agronomiques et forestières concernent autant la croissance et la production que la valorisation.

En amont de ses recherches finalisées et au-delà du clivage animal/végétal, la mécanique peut contribuer à répondre à des questions fondamentales en biologie, qu'il s'agisse du fonctionnement des êtres vivants ou de leur interaction avec l'environnement.

Enfin, l'application à l'ingénierie concerne l'étude des matériaux d'origine biologique soit pour leur utilisation ou leur transformation, soit pour la conception de matériaux ou structures bioinspirés ; à strictement parler on sort du champ de la mécanique pour le vivant, toutefois ce thème s'y rattache par de nombreux aspects.

La section 09 traite autant de questions de mécanique spécifiques des objets vivants que d'ingénierie dédiée. Les objets d'études sont divers, tant par les échelles considérées (du sub-cellulaire à l'individu, voire la population) que par leur nature biologique (animal ou plante, tissu vivant ou mort...). À titre d'exemple, on peut citer la biomécanique des systèmes ostéo articulaire et musculo-squelettique chez l'humain, l'architecture des parois et la biomécanique des arbres dans le monde végétal, la mécanique cellulaire, la mécanique des matériaux biologiques (tissus mous, gels déformables, biopolymères, os, bois).

L'étude de ces objets nécessite des développements spécifiques dans le cadre d'approches typiquement mécaniciennes :

- Lois de comportement mécanique et couplages avec d'autres phénomènes physico-chimiques

- Approches multi-échelles particulièrement pertinentes du fait de la complexité structurelle inhérente au monde vivant

- Interactions fluides-structures, écoulements complexes (sang, sève élaborée...), suspensions concentrées

- Biomécanique des chocs

- Membranes biologiques, coques minces

- Tribologie et propriétés de surface

Par ailleurs, le développement d'approches moins conventionnelles est nécessaire pour la prise en compte de couplages forts entre mécanique et biologie :

- Morphogenèse de tissus, comportement collectif de systèmes cellulaires

- Mécanismes de régulation intégrant perception, transduction et réponse biologique à des sollicitations mécaniques, que ce soit à l'échelle cellulaire (migration, étalement, comportement sous flux), de l'organe (remodelage, cicatrisation), de l'individu (sport chez l'homme, thigmomorphogénèse chez la plante) ou des populations (évolution, adaptation des écosystèmes aux changements climatiques)

- Genèse des forces et des mouvements (cytosquelette, gravitropisme des plantes)

Enfin sur certaines thématiques, les développements nécessitent une contribution forte de l'ingénierie :

- Maîtrise de l'ingénierie cellulaire, tissulaire et osseuse

- Conception de matériaux bio-compatibles, tissus artificiels et biologiques, vieillissement

- Conception de matériaux bio-inspirés (biomimétique)

Les outils utilisés sont très variés : essais mécaniques classiques (traction-compression, ultrasons, ondes), nouvelles techniques (magnéto-rhéologie, nanomécanique, microfluidique, PIV, acoustique picoseconde),

méthodes d'imagerie (optique, IRM, RMN, MEB, microscopie confocale et NL, ultrasons, X, RMN, tomographie, élastographie, AFM, spectroscopie Raman), mesures cinématiques (systèmes optoélectroniques, électromagnétiques, mesures de déformations cristallines par diffraction, corrélation d'images). Parmi les nombreux modèles mécaniques et numériques utilisés on peut citer : tenségrité, approches granulaire et discrète, poroélasticité, lois hyperélastiques avec couplages, couplage fluide/structure. Tous ces outils, qu'ils soient expérimentaux et numériques, doivent pouvoir rendre compte de la variabilité, l'hétérogénéité et la complexité structurelle inhérente aux milieux biologiques.

## 5.2 SITUATION ACTUELLE

Quelques laboratoires de la section 09 ont des activités de recherche entièrement dédiées à la mécanique pour le vivant. Ils sont structurés autour de cette thématique. Toutefois, il reste assez délicat de faire un état de l'art exhaustif des travaux menés en mécanique pour le vivant dans les autres laboratoires émergeant à la section.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce point mais une des principales est à relier à la structuration des recherches qui restent le plus souvent « éparses » et « isolées » au sein d'équipes ou d'axe transversaux rendant leur lisibilité difficile. D'autre part, cette thématique est par nature multi disciplinaire, et les frontières, 09-10, 09-30 mais également 09-05 pour ses approches physiques de la biomécanique sont bien souvent perméables. Les activités de la section 09 bénéficient, notamment, de trois GDR au sein de l'INSIS : Biomécanique des fluides et des transferts – Interaction fluide/structure biologique (GDR2760), Approche multi-échelles de la mécanotransduction (GDR 3162), Recherche sur la biomécanique du choc (GDR2610). La mécanique pour le vivant, dans ses aspects liés à l'humain, l'animal et le végétal, est également la thématique de la section 09 qui est à l'interface avec le plus

grand nombre d'autres instituts du CNRS (INSB, INP, INEE) et d'autres organismes (Centres hospitaliers et INSERM-CEA/NRIA-Pasteur-Curie-INRA-CIRAD via les alliances AVIESAN et ALLENI...).

Concernant le positionnement par rapport à l'international, en biomécanique humaine ou animale une trop faible visibilité subsiste en France avec une structuration et une organisation de la communauté qui restent à améliorer.

Le déploiement opérationnel d'une politique scientifique de pluridisciplinarité apporterait sans nul doute beaucoup à la mécanique pour le vivant. La situation est un peu différente en biomécanique du végétal, où existe un réseau international « plant biomechanics » très minoritaire dans l'ensemble de la biomécanique mais au sein duquel les laboratoires français sont bien reconnus (réseau constitué depuis 1994 à l'initiative de la France et du CoNRS, avec une conférence tous les 3 ans).

## 5.3 RECOMMANDATIONS

Parmi les activités prometteuses ou méritant d'être développées, on peut citer :

- les approches multi-échelles que ce soit au niveau de l'os, du bois ou des tissus mous
- les approches multi-physiques : approches mécaniques, physiques, biologiques, chimiques couplées (exemple : aéroacoustique, mécano-transduction, modèle poreux multiphasique, modèle métabolique)
- Caractérisation *in vitro* mais également *in vivo* des tissus en tenant compte des spécificités des matériaux vivants notamment en terme de variabilité et d'incertitude. Étude et modélisation de l'évolution *in vivo* de ces tissus au cours du temps en fonction de paramètres mécaniques, biologiques, chimiques (remodelage, cicatrisation des tissus, vieillissement des tissus, lignification...)
- Nouvelles approches pour mieux connaître les sollicitations mécaniques s'exerçant

chez un sujet vivant (efforts exercés par les muscles, efforts exercés sur les articulations, efforts subis par le système aérien ou racinaire d'un arbre au vent...)

- Nouvelles approches expérimentales autour de la microscopie, l'acoustique et les mesures de champ, combinaison de méthodes

- Développement de biomatériaux en intégrant notamment l'aspect multi échelle et la bio tribologie

- Aller vers une recherche intégrative de la molécule à la cellule, l'organe et l'individu

Il est important de souligner qu'il existe en pratique de très faibles interactions entre les recherches en biomécanique concernant le monde humain (et animal) et le monde végétal. Bien que d'importantes différences existent dans le type de problèmes posés de nombreux points similaires apparaissent et il serait enrichissant de favoriser des interactions. Cela permettrait de promouvoir des approches amont sur des questions d'intérêt commun telles que :

- La mécanique cellulaire avec interaction entre membranes et fluides biologiques

- Les mécanismes de régulation (systèmes nerveux centralisé versus auto organisation d'un système complexe)

- Design mécanique : comment produire de la résistance en compression à partir de tissus conçus pour la traction, quelles sont les solutions optimales pour des matériaux aux fonctions biomécaniques multiples (exemple du bois)

- Méthode d'investigation du vivant : prise en compte des spécificités des objets d'étude biologiques (variabilité, hétérogénéité, complexité structurelle)

Comme cela pourrait être le cas pour d'autres axes de recherches de la section 09, les interactions avec les sections 10, 30 et 05, voire 28 et 29, gagneraient à être développées en complémentarité notamment sur les thématiques micro-fluidiques, milieux poreux multi phasiques, transferts, dynamiques des fluides complexes, ingénierie tissulaire, imagerie biologique, physique de la cellule, propagation

des ondes dans les milieux hétérogènes... Cette complémentarité constructive pourrait notamment s'élaborer autour de recrutements aux interfaces. Il faudrait enfin renforcer les interactions avec les biologistes et les cliniciens, promouvoir les confrontations *in vivo* avec notamment des modèles animaux.

## 6 – ROBOTIQUE

La robotique est une discipline au cœur de l'ingénierie, se situant à la croisée de la mécanique, de l'informatique et de la physique. Cette discipline jeune se renouvelle assez rapidement ; elle fait face à des verrous dont la résolution nécessite les compétences présentes dans la communauté mécanique. Il est important d'encourager les ponts entre les laboratoires au cœur de la mécanique et cette discipline, qui ne peut pas être considérée comme une discipline mineure. Historiquement, l'interface avec la communauté mécanicienne s'est établi autour des méthodes liées à la description cinématique et mécanique des systèmes articulés ; des recherches gravitent encore autour de ce secteur historique mais il existe aussi quantité de sujets nouveaux où des interactions seraient souhaitables.

Une première gamme de problèmes actuels en robotique à l'interface avec la mécanique concernent la perception, l'action et le mouvement, les capteurs et actionneurs constituant les composants actifs de base d'un robot. Les problèmes mêlent traitement du signal, physique et acoustique (par exemple pour la commande par la parole ou l'écoute binaurale), ainsi que la mécanique du solide. On mentionnera l'exemple du développement récent par des équipes françaises d'un robot marcheur ou roulant dans un environnement glissant, sur glace ou neige, où le contact unilatéral et la possibilité de glissement doivent être modélisés ; le système de commande et la coordination des mouvements doivent être conçus en conséquence. Un important effort concerne aussi les drones volants ; l'exemple

du vol à ailes battues pose des problèmes de modélisation difficiles en dynamique de l'interaction fluides-structures et commande avec prise en compte des incertitudes.

Une deuxième classe de problèmes à l'interface avec la mécanique concerne la conception des robots. Au delà des questions classiques concernant la conception et l'optimisation des systèmes de préhension articulée ou des manipulateurs mobiles, on relève l'émergence de problématiques liées au couplage avec des milieux dont le comportement mécanique est complexe. Ainsi, la mise au point de simulateurs chirurgicaux est un sujet actuel pour lequel il manque encore des simulateurs physiques efficaces, robustes et mécaniquement réalistes donnant la réponse du tissu ; une meilleure compréhension du comportement du système musculo-squelettique aiderait la mise au point de robots aidant à la rééducation ; une description mécanique fine du contact et des chocs demanderait à être incorporée dans le dimensionnement de robots subissant des impacts avec le sol. Le développement de constituants technologiques tels qu'éléments de structure, actionneurs, capteurs ou articulations fait appel à la science des matériaux et micro-matériaux (fort développement de la nano-robotique).

## **7 – TRIBOLOGIE ET INTERFACE**

Sur les dernières années et les objectifs affichés par la recherche des laboratoires français, il convient de noter la nécessité d'aller vers une analyse multi-physique et une compréhension accrue du comportement des systèmes complexes aux échelles spatio-temporelles pertinentes pour optimiser leurs performances et/ou prédire leur durée de vie. Les enjeux futurs portent donc sur la résolution de problèmes mécaniques multi-physiques complexes, mettant en jeu différents couplages entre dynamique des systèmes, tribologie,

physico-chimie, usures, élastoplasticité, aspects thermomécaniques, avec une vision multi-échelle.

Cela se traduit par des interactions entre les mécanismes locaux et le comportement global des systèmes. Un dimensionnement au plus juste des systèmes passe alors par une compréhension et une modélisation des phénomènes physiques des systèmes aux différentes échelles, ainsi qu'une estimation et identification fines des mécanismes aux interfaces ainsi que des propriétés mécaniques des matériaux, de leurs endommagements sous conditions extrêmes et des couplages thermique-mécanique-microstructures existants.

Enfin, la nécessité de s'orienter vers une prédiction plus robuste et une optimisation du comportement des systèmes impose la prise en compte non seulement des comportements non-linéaires mais aussi des dispersions physiques et incertitudes inhérentes aux systèmes.

### **7.1 QUELQUES FAITS MARQUANTS**

- développement de techniques non-linéaire de réduction de modèles aux interfaces en dynamique

- compréhension des mécanismes et des problèmes mécaniques multi-physiques complexes (tribologie, physico-chimie, élasto-plasticité, thermique)

- développement d'outils numériques d'analyse des phénomènes aux différentes échelles (micro/méso/macro)

### **7.2 SYNTHÈSE DES AXES THÉMATIQUES ET ORIENTATIONS APPARAISSANT PRIORITAIRES**

- Compréhension fondamentale des comportements mécaniques aux surfaces et inter-

faces. Études des mécanismes de transformation physique et chimique d'un contact dans différents milieux, du frottement, de l'usure, de la lubrification, des aspects physico-mécaniques, chimie analytique des surfaces, et des effets mécaniques induits.

– Approches numériques en utilisant la dynamique moléculaire afin de comprendre pour prédire les phénomènes physiques, chimiques et mécaniques à l'échelle atomique.

– Développement de techniques numériques avancées pour la prédiction du comportement dynamique des systèmes complexes incluant les non-linéarités liées aux interfaces et la prise en compte des dispersions afin de mettre en évidence la variabilité des réponses des modèles.

– Développement d'outils afin d'aboutir à une identification de paramètres de comportements mécaniques des surfaces et interfaces, linéaires et non-linéaires, aux échelles spatio-temporelles pertinentes.

– Approche couplée itérative et confrontation entre les aspects expérimentaux, de modélisation et de simulation numériques des mécanismes aux interfaces et des phénomènes physiques locaux et globaux associés. Recouvrement des échelles spatio-temporelles.

– Études sur les instabilités dans un contact, l'analyse des débits, la rhéologie des matériaux sous sollicitations extrêmes (pression, cisaillement) pour aboutir à des lois de comportement spécifiques.

## **8 – ENJEUX COMPLÉMENTAIRES DANS LE DOMAINE DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES**

Un certain nombre d'enjeux ont déjà été dégagés dans le descriptif des différentes disci-

plines et thématiques de la section, certains enjeux complémentaires ou transversaux méritent encore d'être précisés :

– Le temps réel que ce soit sur les aspects numériques que sur la modélisation de la modification de système en temps réel (lien avec le contrôle actif).

– Prise en compte du caractère probabiliste incontournable de certains phénomènes ou de certaines réponses.

– Développement des approches de réduction de modèles : une prise de conscience claire est intervenue ces dernières années : malgré des progrès vertigineux des moyens de simulation numérique, la modélisation de certains systèmes restera hors d'atteinte par des approches de représentation classique, en particulier si des enveloppes de réponses à différents paramètres sont attendues.

– Créer des relations avec la communauté de la « computational graphics ». Cette communauté tend à intégrer de plus en plus de mécanique dans les algorithmes de rendu visuel pour améliorer le réalisme (pour les jeux vidéos, films, réalité virtuelle). Les algorithmes proposés sont souvent très robustes et utilisent au mieux les ressources informatiques actuelles. Même si la qualité visuelle prime sur le contenu strictement mécanique (contrainte par exemple pour fixer les idées), les algorithmes développés par cette communauté méritent d'être inspectés.

– Prise en compte dans la simulation numérique des spécificités matérielles des ordinateurs. Alors que c'était le cas à la naissance des ordinateurs, leur évolution n'est plus pilotée par le calcul scientifique mais par le jeu ou le multi-media. Il est donc important que les méthodes numériques et leur implantation suivent au mieux l'évolution des solutions matérielles. L'arrivée des cartes GPU en est un exemple.

– La vérification et la validation des modèles numériques dans le domaine du non linéaire et de la dynamique : estimation d'erreur a posteriori des modèles sur les quantités d'intérêt et recalage

## **9 – MULTI-DISCIPLINARITÉ INTER-SECTION**

La descente dans les échelles plus fines de la matière ou le traitement de phénomènes couplés poussent les recherches de mécanique vers des champs pluri-disciplinaires (physique/chimie/biologie...) qui sont riches d'enseignements et de perspectives. Ce potentiel ne saurait toutefois être pleinement exploité que si la frontière se définit bien comme l'interface entre des disciplines solides. La fertilisation croisée entre chercheurs d'horizons différents nécessite l'excellence de chacun dans son propre domaine. En d'autres termes, il convient de ne pas tout mettre aux interfaces mais bien de s'assurer que cet espace sépare bien des domaines dont l'existence ne serait pas qu'un simple souvenir.

Il est capital de continuer à maintenir l'excellence des thématiques au cœur de la section (certes en les faisant évoluer en lien avec les nécessités de l'inter-disciplinarité). Ce maintien est le gage d'une qualité d'interaction présente et future avec les autres disciplines.

Pour alimenter les recherches à caractère multidisciplinaire sans risquer une dilution trop importante des forces vitales, on ne saurait que trop recommander de le faire dans le cadre d'une démarche intégrée dont les implications sociétales, industrielles, économiques et écologiques sont à la hauteur des grands enjeux nationaux.

## **10 – SYNERGIE DE COMPÉTENCES A L'INTÉRIEUR DE LA SECTION**

La section couvre des chercheurs manipulant des outils et méthodologies assez variées

(on ne parle pas ici de différentes thématiques mais plutôt de différentes manières d'appréhender une problématique : mécanique théorique avec une dose plus ou moins grande de mathématique, démarche d'explication de phénomène «à la physicienne», mise en œuvre de connaissances dans des réalisations concrètes, modélisation de système, génération de connaissances via l'expérimentation, développement de nouvelles méthodes numériques...

Avec la complexité grandissante des systèmes adressés, chaque approche prise individuellement se trouve très vite limitée. Un renforcement de l'interaction entre ces démarches est important. En particulier, la mécanique théorique mériterait d'être renforcée dans cet esprit d'interaction. De même les initiatives visant à regrouper au sein d'une même équipe d'un laboratoire expérimentateurs et numériques méritent d'être saluées et soutenues.

## **11 – ASPECTS SOCIÉTAUX ET RELATIONS AVEC L'INDUSTRIE**

La très grande majorité des laboratoires rattachés à la section ont des relations contractuelles avec l'industrie. Ceci n'est pas surprenant compte tenu du positionnement de la section à la fois sur la génération de connaissances de base, que dans la démarche de mise en œuvre de ces connaissances dans des réalisations concrètes. Il faut cependant insister sur la qualité actuelle de ces relations. Elles sont souvent de longue durée (cadre CIFRE par exemple) et bien souvent pérennes (parfois courant sur plusieurs décennies). Les travaux réalisés sont le plus souvent un mixage de génération de connaissance et de mise en œuvre. Le rôle du CNRS dans l'équilibre des relations entre laboratoires et industriels doit être salué que ce soit d'un point de vue contractuel via les nombreux contrats cadres

mis en place que via la « surveillance » scientifique des travaux réalisés. Cet équilibre est une chance pour la recherche française et l'industrie française et doit être préservé. La France a réellement une position originale sur cette question (dans de nombreux pays, les relations sont soit beaucoup moins présentes soit très axées sur du service et/ou du très court terme).

Cette position originale devrait servir de levier pour aider au maintien des emplois de production en France en innovant sur les procédés de fabrication avec une vision durable et de préservation de l'environnement :

- réduction des utilisations énergétiques
- possibilité de transformer et assembler de nouveaux matériaux (composites, bois, fibre végétale...).
- nouvelles technologies de production liées au recyclage : (40% des aciers produits en France sont déjà basés sur l'acier recyclé, de même le béton ou les matériaux plastiques sont réutilisés). La réutilisation optimale de matériaux est un enjeu très important de la recherche actuelle. En clair comment déconstruire (rupture à différentes échelles : chimique ou à plus grande échelle) et reconstruire (réassemblage des matériaux).

## **11.1 PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ ET PME**

Si les relations laboratoires/industrie sont à saluer pour leur vigueur, il n'est pas de même pour les relations laboratoires/PME. Les raisons sont complexes. Il faut noter qu'il y a une opportunité nouvelle de mise en relation des PME et laboratoires de recherche via les pôles de compétitivité qui font maintenant partie du paysage comme nouvel acteur dans l'organisation de la recherche.

## **11.2 MISE EN RELATION DES INDUSTRIELS VIA LES LABORATOIRES**

Les approches génériques développées dans les laboratoires relevant de la section permettent des applications multiples et les chercheurs impliqués participent à la diffusion des technologies d'un domaine à un domaine connexe.

Les pièces tournantes conduisent par exemple à beaucoup de préoccupations similaires que ce soit pour les turbines de centrale électrique que pour les réacteurs d'avion. De même l'analyse numérique de pièces géométriquement complexes touche à la fois l'automobile et l'aéronautique. Un dernier exemple est la similitude des mécanismes entre bandes de cisaillement dans les matériaux et les failles géologiques dans le sol. En conclusion, la section participe à la création de connaissances et à leur mise en œuvre pour de nombreuses industries différentes. Dans ce domaine les chercheurs de la section jouent le rôle de marieur entre industriels sur des produits non concurrents mais qui requièrent des outils proches.

## **11.3 SÉCURITÉ DES PERSONNES ET DES BIENS**

La construction des bases scientifiques des outils de gestion de durée de vie des installations industrielles et de génie civil est un enjeu important. Non seulement il est question de protéger les personnes et les biens mais la dégradation écologique liée à un incident est à juste titre devenue intolérable. L'explosion de la plateforme BP dans le golfe du Mexique en est un exemple suffisant.

La construction des bases scientifiques des outils de gestion de durée de vie implique des recherches dans de nombreux axes de la section dont l'amélioration des techniques de contrôle non destructif, l'amélioration des

outils de simulation et la prise en compte d'approche probabiliste dans ces outils.

## 11.4 PRÉSERVATION DU PATRIMOINE

Dans le domaine de la préservation du patrimoine, la section joue un rôle important dans la lutte contre le vieillissement des œuvres d'art, bâtiments de tout type. Cette activité va certainement se renforcer dans le futur avec la prise de conscience de la valeur économique de la culture dans de nombreux pays.

## 11.5 SANTÉ ET VIEILLISSEMENT

La «Mécanique pour le vivant» est, par nature, au cœur d'enjeux sociétaux et indus-

triels importants et d'autant plus avérés si l'on considère par exemple : le vieillissement de la population, la réduction des utilisations énergétiques, l'augmentation de la pollution, l'augmentation de l'obésité...

Quelques exemples de travaux à impact sociétal direct sont :

- la possibilité de transformer et d'assembler de nouveaux matériaux (composites, bois, fibre végétale...)

- l'innovation nécessaire pour utiliser le bois de moins bonne qualité

- l'utilisation de la mécanique/acoustique dans le diagnostic de pathologies liées aux systèmes cérébral, auditif, cardio vasculaire, osteo articulaire, respiratoire...

- la conception de biomatériaux durables de remplacement

- l'étude de l'impact sur la santé de nanoparticules impliquées dans les matériaux nanostructurés.

---

### Note

(1) Les publications en élastographie ont été multipliées par 10 en 10 ans et la France occupe aujourd'hui la seconde place derrière les USA. Deux start-up (Echosens, Supersonic Imagine) ont été créées en France en relation avec cette thématique.

# 10

---

## MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS : TRANSPORTS, TRANSFERTS, PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

### *Président*

Gilles FLAMANT

### *Membres de la section*

Christian ANGELBERGER

Philippe BLANC

Jean-Pierre BŒUF

Jean-Pierre CAMBON

Patrick CARRÉ

Cathy CASTELAIN

François CHARRU

Luminita DANAILA

Pascale DESGROUX

Benoît GOYEAU

Élisabeth GUAZZELLI

Pierre HALDENWANG

Karl JOULAIN

Jack LEGRAND

Annie MARC

Céline MORIN

Stéphane PASQUIERS

Michel QUINTARD

Florence RAYNAL

Benoit ROUSSEAU

Exercice d'introspection ou de prospective? Le rapport de conjoncture est plus un état des lieux qu'une projection dans l'avenir. Exercice disciplinaire ou multidisciplinaire? Il est clairement disciplinaire, même dans une section comme la S.10, très pluridisciplinaire. Passage obligé de chaque mandat ce rapport a le mérite d'identifier une communauté de recherche par ses champs d'investigation, ses questions et ses pratiques. Nous espérons qu'il nourrira quelques débats.

## 1 – MÉCANIQUE DES FLUIDES

### 1.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT

La mécanique des fluides est une discipline dont le statut a notablement évolué au cours des dernières décennies. Partie du statut simple de discipline de base pour l'hydraulique et l'aéronautique, la mécanique des fluides s'est avérée champ d'expériences fondamentales pour l'hydrodynamique physique, la physique non-linéaire, les mathématiques appliquées, et

naturellement la turbulence. Elle est également une des disciplines qui sous-tendent bon nombre d'évolutions technologiques dans la plupart des grands secteurs économiques (transports, énergie, génie chimique, environnement, sécurité, aménagement du territoire, élaboration des matériaux, biomédical...). Par ailleurs, elle joue un rôle tout aussi central dans le domaine des sciences de l'univers (météorologie, climatologie, océanographie, planétologie, magnétisme naturel, cosmologie, etc.). Une dernière particularité de la mécanique des fluides tient aux outils d'investigation que cette discipline a su développer, notamment dans les domaines de la métrologie et de la simulation numérique. Par exemple, il n'est pas rare que d'autres domaines tels que la physique non-linéaire, les plasmas, l'astrophysique, la chimie, etc., empruntent à la mécanique des fluides numérique les compétences algorithmiques qu'elle a développées.

Constatant ce large spectre d'intervention, on ne s'étonnera pas qu'au sein du CNRS, la mécanique des fluides soit aujourd'hui répartie sur plusieurs instituts, et sur plusieurs sections. La section 10 en gère cependant une partie importante, en particulier les développements technologiques, et un certain nombre de sujets propres au cœur de la discipline y sont fortement présents. C'est le cas notamment de la turbulence, un problème-clé d'importance fondamentale. Cette dernière y est étudiée dans des conditions significatives vis-à-vis des champs d'application. Ceci nécessite des moyens de diagnostic et de simulation en adéquation avec ces champs d'application, permettant d'accéder à une connaissance très fine de la structure des écoulements et des mécanismes mis en jeu. Ces aspects méthodologiques sont fortement présents dans les laboratoires de la section 10.

Les thèmes d'ampleur qui se sont dégagés au cours des dernières années sont :

- l'étude des **mécanismes non linéaires** en mécanique des fluides, qui reste un passage obligé pour la compréhension de la transition laminaire-turbulent en particulier. L'état des connaissances à propos de certains écoulements de base permet désormais d'orienter

en partie ces recherches vers l'objectif de **contrôler** l'apparition du régime turbulent. Les outils d'investigation expérimentale, les modèles théoriques et les outils de simulation se développent activement en fonction de ce nouvel objectif ;

- la **turbulence développée** qui fait également l'objet d'une attention soutenue, notamment dans des situations d'anisotropie (rotation, stratification, magnétisation...). Cette meilleure connaissance des écoulements turbulents permet également de tester les différentes **modélisations numériques de la turbulence** par les diverses méthodes de dissipation, statistique et/ou de sous-maille. Il est évident que toute avancée dans la modélisation numérique de la turbulence en configuration réelle constitue un enjeu stratégique pour les applications industrielles actuelles et futures ;

- l'étude du **transport turbulent** qui s'avère être un sujet d'importance sur lequel la simulation numérique a fourni ces dernières années de nombreuses données prédictives qui doivent être validées par l'expérience. Les particules étudiées couvrent un large spectre, allant du scalaire passif jusqu'aux particules sédimentaires. Ces études incluent naturellement les transferts de chaleur turbulents ;

- l'étude de **l'interaction fluide-structure** (au sens large, incluant la nage ou le vol de structures déformables, et les interactions fluide-sédiments, entre autres exemples) qui est un sujet d'applications aussi bien industrielles qu'environnementales ;

- la **microfluidique** qui est une thématique en développement constant pour les questions fondamentales posées par des écoulements dans des systèmes de taille très réduite, pour la dynamique des micro-bulles ou des micro-gouttes, et pour l'approche d'effets mésoscopiques nouveaux ;

- la biomécanique des fluides, ou **bio-fluidique**, qui porte sur l'étude des écoulements de fluides biologiques et du transport qu'ils engendrent, depuis les végétaux jusqu'à la physiologie humaine. L'interaction fluide-structure prend dans ce domaine une importance particulière. On peut mentionner également la mise

au point de systèmes biomimétiques inspirés du comportement des êtres vivants. On voit ici se développer de fructueuses interactions avec la physico-chimie et la biologie ;

– la dynamique des **fluides complexes**, et/ou en milieux complexes, qui vise à analyser la dynamique des écoulements des fluides à rhéologie sophistiquée (écoulements polyphasiques, polymères, suspensions de particules, milieux granulaires, pâtes et poudres, fluides biologiques, milieux poreux) ;

– l'**aéro-acoustique**, ou acoustique non-linéaire, qui étudie la génération des ondes acoustiques par les écoulements, leur propagation au sein des écoulements turbulents, ou inversement, la génération d'écoulements par un champ acoustique, dans les micro-systèmes en particulier.

D'une manière générale, on assiste à un élargissement du champ des investigations conduites par les mécaniciens des fluides, du fait, d'une part, que l'aéronautique et l'espace « consomment » désormais moins de sciences de base, et d'autre part, de l'émergence de nouveaux problèmes comme évoqués ci-dessus. Ainsi, il n'est pas rare que des mécaniciens des fluides s'intéressent à des processus industriels très particuliers en participant à l'amélioration de leur performance et/ou à la diminution de leurs nuisances. On trouve de nombreux exemples dans l'élaboration ou le traitement des **matériaux**, la **séparation** de phases ou d'espèces, la dynamique des **interfaces**, la **combustion**, etc. Les « ingrédients » supplémentaires qu'ils peuvent désormais prendre en compte sont, par exemple, le changement de phase, les réactions chimiques/biologiques, le rayonnement, la criticité du fluide ou du mélange, la présence de particules ou de bio-organismes...

## 1.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

Ces différentes thématiques connaissent des degrés divers de développement dans les

laboratoires français. Les moyens d'action et d'organisation ne relèvent pas uniquement du CNRS ; ils sont, en fait, partagés avec plusieurs autres acteurs importants : les universités car une majorité d'unités de recherche sont mixtes, les contractants industriels qui financent (et qui parfois embauchent les docteurs), l'ANR, les leaders pré-industriels de certains secteurs applicatifs comme l'ONERA, CEA, IFP, INRS, CEMAGREF, etc. La multiplicité de ces différents acteurs est, bien sûr, source de diversité et de dynamisme. Malgré cela, certains thèmes séduisent un grand nombre de laboratoires, alors que d'autres sujets restent moins souvent traités. Néanmoins, les laboratoires de la section se positionnent, d'une manière générale, en très bonne place au niveau mondial dans la plupart des domaines cités plus haut.

Parmi les acteurs orientant cette recherche, nous voyons apparaître de plus en plus un acteur inattendu : la bibliométrie. Celle-ci tend à renforcer le rôle joué par les effets de mode : pour avoir un taux de citations élevé, il n'est pas recommandé de travailler sur un sujet peu couru, ou de changer de thématique. De plus, pour flatter la bibliométrie, il vaut également mieux travailler sur une « manip » de coin de table que sur un moyen d'essai d'envergure ; de même, mieux vaut effectuer une simulation numérique en géométrie périodique qu'en géométrie plus réaliste... Ces évolutions risquent d'appauvrir la discipline. Les effets pervers de la bibliométrie ne sont pas seuls responsables : la difficulté de remplacer le départ des ingénieurs et techniciens fait que l'expérimentation devient de plus en plus difficile pour le chercheur, a fortiori pour un doctorant. Dans le même ordre d'idées, rares sont les laboratoires qui peuvent compter sur un ingénieur de maintenance de logiciels « lourds » de simulation numérique (collaborateur pourtant indispensable si l'on veut que ces logiciels circulent dans la communauté). Sur certains thèmes que nous jugeons à fort enjeu applicatif, nous notons avec inquiétude le déclin du nombre de docteurs candidats au concours de chargés de recherche.

Les développements de la discipline ont bénéficié de nets progrès dans les moyens de

l'expérimentation : visualisation rapide et à haute résolution, vélocimétrie à imagerie de particules (PIV) tridimensionnelle, tomographie de systèmes complexes (e.g., de systèmes vasculaires). Le développement de ces nouvelles techniques a engendré des volumes considérables de données, dont la manipulation et l'analyse posent des problèmes semblables à ceux rencontrés par la simulation numérique. Enfin, considérant la situation stratégique de la modélisation, et de la simulation numérique de la turbulence en particulier, pour ce qui est du transfert technologique, nous notons une nette amélioration de nos moyens de calcul. En effet, après quelques années difficiles, nous constatons une récente remise au niveau international des moyens nationaux mis à la disposition de notre communauté scientifique. Pour l'avenir, nous souhaiterions un processus plus continu d'évolution...

## 2 – GÉNIE DES PROCÉDÉS

### 2.1 DESCRIPTION DE LA THÉMATIQUE

La discipline du Génie des Procédés regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires pour aborder l'étude, la conception et l'optimisation des procédés complexes de transformations physico-chimiques et biologiques de la matière et de l'énergie. Le Génie des Procédés intègre ainsi les compétences du génie chimique, de la thermodynamique, de la chimie-physique et de la biologie, avec une approche multi-échelle en temps et espace, allant des processus élémentaires jusqu'au dimensionnement des réacteurs et à la simulation et la commande des procédés.

Les recherches portées par le Génie des Procédés contribuent à répondre à de nombreux enjeux sociétaux :

- la compétitivité de l'industrie par l'obtention de produits ayant des propriétés d'usage : celle-ci ne peut se concevoir en dehors du cadre de développement durable et de l'incidence sur la santé ;

- l'environnement et l'énergie : ce point intègre les industries de traitement de l'air et de l'eau, la réhabilitation des sols, le stockage du carbone, de même que les économies et les progrès récents dans le domaine des énergies renouvelables ;

- la maîtrise des risques et la sécurité, en incluant les risques pour l'homme et pour l'environnement ;

- la santé et l'alimentation, par la production industrielle de produits nouveaux et/ou mieux maîtrisés, destinés à répondre aux besoins croissants des populations.

La science du Génie des Procédés se caractérise par le lien qu'elle établit entre la démarche analytique et la démarche synthétique qui conduit à la vision systémique des problèmes. Par définition, elle a vocation à intégrer une approche multi-échelle, allant du processus au procédé, en prenant en compte les contraintes techniques, économiques et environnementales.

Le Génie des Procédés se positionne clairement dans un contexte d'interdisciplinarité. Si la thermodynamique et les cinétiques physiques, chimiques et biochimiques restent à la base de la discipline, les développements récents en mécanique des fluides numériques, en automatique, en méthodes de simulation, en analyse numérique, mais aussi en instrumentation et miniaturisation des systèmes, ont ouvert de nouvelles voies d'approche de la complexité des procédés, tout en permettant d'envisager une meilleure intégration des processus à des échelles multiples.

Le domaine de la méso-échelle, du micro-métrique au millimétrique, qui correspond à l'échelle des interfaces et des processus de transfert, reste un domaine privilégié de la discipline. Ainsi, la compréhension et la quantification des processus physico-chimiques à cette échelle restent deux des éléments prépondérants.

rants dans la conception et l'optimisation des procédés conduisant à l'élaboration de produits ou de matériaux à qualité contrôlée. La simulation moléculaire, de plus en plus utilisée dans la prévision des propriétés thermodynamiques des corps purs et des mélanges, ouvre aussi des voies nouvelles pour l'optimisation des catalyseurs et des adsorbants. À l'échelle du procédé, les outils de simulation numérique en mécanique des fluides ont permis de nouvelles explorations des opérations unitaires du génie chimique. Le lien avec la réaction chimique ou la réaction biochimique en termes de mélange et de micromélange, le terme micromélange supposant ici obligatoirement une réaction chimique ou biochimique et faisant donc intervenir l'échelle moléculaire, reste un fort enjeu dans la maîtrise de la qualité des produits. De son côté, le génie des transferts et des séparations doit résoudre des problèmes complexes, en particulier dans les domaines des biotechnologies et du traitement des effluents. Le Génie des Biosystèmes intègre des défis qui lui sont spécifiques, liés, en particulier, au concept d'usine cellulaire vivante. Le Génie des Produits constitue aussi l'une des composantes récentes du Génie des Procédés par la prise en compte des interactions entre les conditions opératoires du procédé et les propriétés d'usage des produits générés. Cette démarche doit permettre une optimisation prédictive du procédé sur la base des propriétés recherchées, tout en intégrant les contraintes de développement durable.

## 2.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

*Les pistes de recherche proposées en Génie des Procédés sont les suivantes :*

– l'étude des **interactions « hydrodynamique-transfert-réaction »** : la compréhension des écoulements polyphasiques reste un grand enjeu pour l'étude des transferts entre phases en situation réelle (bulles, coalescence, rupture, suspensions, fluides rhéologiquement

complexes...), et pour l'optimisation des équipements. Le Génie des Procédés doit adapter à ces préoccupations l'hydrodynamique expérimentale et les méthodes de la mécanique des fluides numériques.

– l'**intensification des procédés** : ce point intègre la conception et le dimensionnement de nouveaux réacteurs basés sur une approche multi-échelle, l'architecture des procédés intégrant les réacteurs micro-structurés et les réacteurs multi-fonctionnels. Un meilleur contrôle local de la réaction doit être recherché par : la micro- ou méso-structuration des réacteurs et séparateurs, la commande et le contrôle local, ou l'utilisation de matériaux à propriétés non isomorphes et de microsystèmes intégrés. Ce domaine s'appuie sur les travaux en microfluidique et l'intégration plus poussée des aspects physiques et chimiques dans les modèles.

– l'étude des **cinétiques de réactions** chimiques, biochimiques et photochimiques dans différentes phases (liquide, supercritique, gaz) par la simulation de schémas cinétiques et l'évaluation des constantes thermodynamiques et cinétiques. En particulier, la **thermodynamique** des équilibres entre phases est essentielle pour l'amélioration des modèles. La complexité des milieux et des systèmes réactionnels, tels que les produits naturels ou artificiels, les mélanges complexes, et les systèmes vivants, doit être prise en compte ;

– la **commande, l'optimisation et la simulation** des procédés, par le développement de méthodes spécifiques et l'instrumentation des réacteurs. Ces outils doivent intégrer, outre les objectifs de productivité et de contrôle de fonctionnement, les notions liées à la sécurité des procédés et à leur éco-conception ;

– le **génie des séparations**, particulièrement dans le cas des molécules biologiques, des aérosols, ou des gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ). Il s'agit, en particulier, des procédés membranaires et chromatographiques ou des séparations liquide-liquide. L'architecture des procédés de séparations, le couplage des méthodes, leur intégration au sein des unités de production, restent à approfondir. Les enjeux sont très

grands en purification de biomolécules, en préparation de produits pharmaceutiques ultra purs à l'échelle semi-industrielle, et en élimination de molécules polluantes ;

– le **génie des produits**, de plus en plus concerné par la production de milieux divisés, fluides complexes, nanoparticules, produits fonctionnalisés. Ces produits constituent de nouveaux défis pour l'étude des phénomènes interfaciaux et les relations entre procédés et propriété d'usage. À titre d'exemple, l'agglomération, le compactage ou le transport de solides pulvérulents restent à mieux maîtriser. Les travaux doivent permettre une optimisation prédictive du procédé sur la base des propriétés recherchées, tout en intégrant les contraintes de développement durable, liées à la sécurité et la santé. La Thermodynamique des Systèmes, incluant ces paramètres, est une discipline à développer ;

– le **génie des procédés biologiques** : la compréhension et la maîtrise de l'activité d'un organisme cellulaire vivant, placé dans l'environnement contraignant du réacteur, nécessitent d'associer, dans une approche multi-échelle spatiale et temporelle, les mécanismes intracellulaires, les échanges avec le milieu (masse, enthalpie, entropie, rayonnement, quantité de mouvement), et les échanges du système avec l'extérieur ;

– le **génie des procédés pour l'environnement**, avec une approche pluridisciplinaire prenant en compte les interactions à l'échelle moléculaire et microscopique qui gouvernent la mise au point de procédés à grande échelle, propres et sûrs. L'analyse des cycles de vie des procédés et des produits ne doit pas être occultée, de même que la recherche de biosolvants, de biosorbants et la valorisation des ressources renouvelables et des co-produits des procédés ;

– le génie des procédés pour la **production d'énergie**, avec un effort important vers les énergies renouvelables, l'utilisation rationnelle de l'énergie, les procédés de séquestration du CO<sub>2</sub>, les procédés pour les carburants de troisième génération, les procédés solaires hautes et basses températures, les procédés de stockage de l'énergie.

*Les moyens d'action et d'organisation doivent être les suivants :*

– poursuivre une forte **structuration méthodologique** de la discipline en s'appuyant sur la Société Française de Génie des Procédés et la Fédération Européenne de Génie Chimique, et maintenir un cœur de discipline fort ;

– faire émerger des **centres spécialisés** développant une interaction spécifique avec une discipline connexe ou une filière industrielle particulière ;

– encourager les **démarches pluridisciplinaires** avec les chimistes, les biologistes, les physiciens, mais aussi avec les spécialistes des matériaux, de la mécanique et de l'énergie ;

– renforcer les partenariats au niveau **international** ;

– mettre en place une démarche prospective sur les **procédés du futur**, en s'appropriant les découvertes de chimie/physique/biologie pour concevoir de nouveaux procédés, et en identifiant de nouvelles problématiques scientifiques à partir des questionnements industriels ;

– poursuivre les actions de soutien aux **programmes pluridisciplinaires** et aux **plateformes**, ciblés sur les axes prioritaires de la discipline, en s'appuyant sur des collaborations accrues entre organismes de recherche et universités.

## 3 – PLASMAS FROIDS/LASER

### 3.1 DESCRIPTION DE LA THÉMATIQUE

Les plasmas froids sont des gaz ionisés, obtenus à des pressions de gaz allant du micro bar à plusieurs bars, voir même au-dessus, dans lesquels l'énergie électrique peut être

couplée de façon continue, impulsionnelle, radiofréquence, micro-onde, laser, etc. Le couplage fort et non linéaire entre le plasma et les champs électromagnétiques nécessaires à sa création et à son entretien engendre une riche variété de phénomènes, particulièrement intéressants à étudier du point de vue physique, avec des développements importants vers la chimie des gaz et des surfaces.

Les plasmas froids hors équilibre thermodynamique ou thermiques, constituent une thématique de recherche importante en raison, d'une part, de la richesse des phénomènes physiques dont ils sont le siège et, d'autre part, de la très vaste gamme d'applications technologiques, industrielles ou sociétales, qui n'ont cessé de se diversifier depuis 40 ans. La pluridisciplinarité et la grande diversité d'applications des plasmas froids sont certainement une force de cette thématique au sein de la section 10 mais peuvent aussi nuire à son unité ou à sa visibilité. L'unité du domaine réside dans la physique des décharges électriques, étudiées autant par l'expérimentation que par la modélisation/simulation avec un couplage de plus en plus fort entre les équipes de modélisateurs et d'expérimentateurs, et les méthodes de diagnostic des plasmas générés par ces décharges, notamment les spectroscopies optiques et spectrométrie de masse, en constant développement. Le développement de nouvelles sources de plasma, de nouveaux concepts de décharges et leur optimisation en terme de couplage d'énergie électrique et de production d'espèces actives, est une préoccupation majeure des chercheurs de la section, en fonction des applications visées.

Depuis une dizaine d'années les travaux sur les plasmas froids en France peuvent être déclinés en quatre axes principaux, en liaison avec les applications des recherches et qui constituent des enjeux technologiques forts :

– **matériaux** : gravure en microélectronique, dépôt de couches dures, traitement de polymères, nitruration et implantation ionique dans les métaux, soudure et découpe en métallurgie, synthèse de poudres, de nano tubes, et de matériaux micro- et nano structurés, nettoyage de surfaces ;

– **énergie** : synthèse de l'hydrogène, physique et technologies pour ITER, dépôt de couches photovoltaïques, lasers à gaz, sources lumineuses à basse consommation, écrans plasmas, dépôt de couches actives pour membranes à combustibles ;

– **environnement** : conversion des polluants atmosphériques ( $\text{NO}_x$  et COV), combustion propre, destruction des agents bactériologiques, stérilisation des surfaces, vitrification des déchets ;

– **transport** : contrôle d'écoulement, déclenchement et contrôle de la combustion, propulsion spatiale.

Une part importante des travaux de la communauté est liée à l'élaboration ou au traitement des matériaux, par des procédés mettant en œuvre les plasmas hors équilibre, les plasmas thermiques, ou les lasers. Bien que certains des procédés concernés soient déjà utilisés dans le monde industriel, leur optimisation n'est pas toujours acquise. La conception de nouveaux procédés est un aspect important de la recherche. Les chercheurs appartenant à des disciplines différentes travaillent ensemble aux interfaces plasmas/matériaux/génie des procédés, ce qui donne une dynamique certaine à cette thématique.

Le développement de nouvelles sources de plasmas, dans différentes gammes de pression, est également un axe fort : plasmas homogènes sur de grandes surfaces pour les applications en microélectronique ou pour le traitement des matériaux, micro plasmas à densité d'énergie élevée comme sources d'espèces réactives ou de photons, plasmas magnétisés pour la propulsion, plasmas impulsionnels pour un contrôle de la réactivité chimique... La connaissance de cette réactivité et son contrôle, notamment dans les mélanges de gaz moléculaires complexes, motive de nombreux travaux avec diverses finalités telles que les matériaux, la conversion de polluants, le contrôle de la combustion. La réduction des coûts énergétiques des procédés plasmas est en filigrane de ces recherches. La nécessité de développer de nouveaux diagnostics expérimentaux est par ailleurs une préoccupation

constante de la communauté des chercheurs plasmas/laser.

## 3.2 LABORATOIRES

La communauté plasma/laser en France est de taille modérée mais elle est répartie sur l'ensemble du territoire. Les laboratoires de la section 10 entièrement dédiés à la thématique, et de taille substantielle, sont assez peu nombreux, situés à Orléans, Orsay, Palaiseau, Toulouse. Des équipes à effectifs plus limités, et de taille variable, sont réparties dans un nombre important de laboratoires à Châtenay-Malabry, Grenoble, Limoges, Marseille, Nancy, Nantes, Paris, Perpignan, Rouen, Villetaneuse. Des laboratoires universitaires (non UMR ou UPR) jouent également un rôle important dans la communauté (Clermont-Ferrand, Paris, Pau). Plusieurs GDR du CNRS structurent certaines des activités de recherche.

Des chercheurs de la section s'impliquent dans les travaux de la Fédération ITER, qui est un exemple pertinent de rapprochement entre les communautés « plasmas froids » de la section 10 et « plasmas chauds » de la section 04.

Le « Réseau Plasmas Froids », rattaché à la Mission des Ressources et Compétences Technologiques (MRCT) du CNRS, créé en 2002, est devenu au fil des années un élément structurant et qui contribue à maintenir l'unité de ce domaine scientifique malgré la diversité de ses applications. Il concerne tous les laboratoires de la communauté plasma/laser, CNRS et/ou Universités, et a pour but de favoriser les échanges de compétences et de moyens entre les équipes.

## 3.3 RECHERCHES ACTUELLES ET AXES DE DÉVELOPPEMENT

Les recherches actuelles en section 10 sur les plasmas froids et leurs applications peuvent

grosso modo se décliner en trois catégories : 1/ les travaux de fond, sur le long terme et qui constituent le « cœur de discipline », concernant la physique des décharges et la réactivité des plasmas générés, la cinétique chimique dans les plasmas réactifs, les données de base pour la compréhension de la physico-chimie hors-équilibre ou à l'équilibre thermodynamique, les interactions entre plasmas et surfaces (chimiquement inertes ou catalytiques) ; 2/ les sujets non très récents mais toujours d'actualité. Parmi ceux-ci, citons par exemple, mais de façon non exhaustive : nouveaux propulseurs, modification d'écoulement, sources de rayonnement énergétique ou à basse consommation, contrôle et déclenchement de combustion, conversion des polluants atmosphériques et réduction des émissions polluantes de l'industrie et des transports, production d'hydrogène et de gaz de synthèse, valorisation de la biomasse, croissance et organisation de poudres, nouvelles chimies pour les procédés de la microélectronique, dépôts de couches minces nano structurées, films d'alliages métalliques amorphes et alliages de haute entropie... ; 3/ les thématiques en forte expansion à l'heure actuelle : matériaux pour l'énergétique et la transformation de l'énergie, nanomatériaux, interactions des plasmas avec la matière vivante...

Les recherches en développement ou les plus émergentes concernent en particulier (sans préjuger de leur importance relative)

- les microdécharges et microplasmas, pour différentes applications ;
- les plasmas impulsionsnels de différents types dans les gaz ou au voisinage de surfaces (décharges nanosecondes et décharges de surface à pression atmosphérique, décharges dans les capillaires, décharges RF pulsées...);
- les plasmas à pression atmosphérique (ou proche) appliqués à la médecine et à la biologie : les interfaces plasmas/biologie seront probablement amenés à se développer fortement dans l'avenir (thématique en forte évolution au niveau international) ;
- les sources de lumière dans le domaine des courtes longueurs d'onde (UV, VUV) pour

les traitements de polluants (eaux et air, photocatalyse), certains procédés industriels et des applications biomédicales, traitement des bio-films ;

- les décharges dans les milieux di-phasiques (procédés aérosols, décharges dans les liquides, dans les structures alvéolaires) ;

- les plasmas atmosphériques pour le contrôle de combustion ou d'écoulement ;

- les nouvelles applications des plasmas à pression atmosphérique telles que la synthèse de molécules, le nettoyage et la fonctionnalisation de surfaces, l'élaboration de nano matériaux ;

- les sources d'ions positifs ou négatifs et la génération de plasmas ion-ion, les phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés (application à la propulsion, la fusion, la microélectronique) ;

- les plasmas de bord dans le réacteur ITER, et l'injection de neutres ;

- les plasmas pulsés à basse pression pour un meilleur contrôle des procédés de dépôt et de gravure des matériaux ;

- la synthèse de nano objets, fonctionnalisation, métrologie et détection de nano poudres ;

- la nano structuration des matériaux et des surfaces : obtention de couches minces nano composites multifonctionnelles pour différentes applications, contrôle des propriétés de surfaces (adhésion, mouillabilité...) pour application à la métallurgie ;

- l'électronique de grande surface, la micro- et nano-optoélectronique : les cellules solaires (silicium amorphe, microcristallin, à hétérojonction, à nanofils, couches épitaxiées), les écrans plats utilisant le silicium monocristallin, les dépôts de films nano structurés et les nano cristaux pour les diodes électroluminescentes.

Quelques exemples de travaux méritent également d'être cités pour ce qui concerne les utilisateurs de sources laser pour le développement de procédés innovants : la modification des propriétés de matériaux (dopage, recuit,

cristallisation, modification d'indice), la création de nouveaux matériaux tels que les films minces, nano structurés, la production de nano agrégats fonctionnalisés en milieux gazeux ou liquide. La nano/micro structuration de surface est actuellement très étudiée, ainsi que le LIFT (Laser Induced Forward Transfer) permettant des dépôts sélectifs (structures, spots, lignes de matériaux métalliques et/ou organiques) avec une résolution micrométrique. Des procédés de micro/nano usinage sont également étudiés, notamment par renforcement local du champ laser.

### 3.4 VALORISATION

Les grands organismes tels que l'ONERA, le CEA, le CNES, l'ADEME... ainsi que des centres de recherche de groupes industriels publics ou privés sont fortement impliqués dans les recherches à finalité des différents laboratoires ou équipes. Les chercheurs sont souvent sollicités par des PME/PMI pour des collaborations ponctuelles et ciblées. On peut également remarquer une forte implication des équipes dans des programmes subventionnés par l'ANR, en réponse aux appels d'offre « programmes blancs » ou plus ciblés. Le nombre de dossiers soumis à l'Agence dans le cadre de ces appels est important, avec une bonne synergie entre les laboratoires sur l'ensemble du territoire.

### 3.5 RECOMMANDATIONS

La communauté des plasmas froids française est caractérisée par une longue tradition d'études fondamentales, mais aussi par des acquis technologiques réels et son implication dans une large gamme d'applications industrielles. Elle doit veiller à conserver un bon équilibre entre recherches amont s'appuyant sur des diagnostics et des modèles de plus en plus performants et sophistiqués, et leurs appli-

cations. Cet équilibre pourra être aidé par le recrutement en section 10 de chercheurs sur des programmes liés au « cœur de discipline » mentionné plus haut. L'enseignement joue à ce stade un rôle majeur et il est apparu important de maintenir la spécificité et la qualité des formations universitaires françaises en physique des plasmas froids.

Cette communauté est bien reconnue au niveau international et elle possède une réelle spécificité, de plus en plus à l'interface avec d'autres disciplines, en premier lieu celles de la section 10. Elle doit continuer à maintenir son unité malgré la diversité de ses applications, par des actions structurantes telles que celles du réseau national « Plasmas Froids » de la MRCT, et en continuant une politique active de GDR. Les synergies avec d'autres sections du CoNRS, essentiellement 04 (par exemple sur les plasmas de fusion) et 08 (sur les nanotechnologies, l'électromagnétisme, l'énergie électrique), méritent d'être soutenues ou approfondies.

## 4 – COMBUSTION

### 4.1 PRÉSENTATION

#### **La combustion : une science multidisciplinaire**

Les phénomènes de combustion sont très complexes et impliquent la mécanique des fluides, la thermodynamique, les phénomènes de transport et la cinétique chimique. La combustion pose aussi de nombreux problèmes de couplage avec les modes acoustiques du système, ainsi qu'avec le rayonnement. Par ailleurs, la combustion s'effectue au travers d'une cinétique chimique complexe faisant intervenir un grand nombre d'espèces impliquées dans plusieurs centaines de réactions élémentaires, et dont les vitesses de réaction ont un comportement fortement non-linéaire en fonction de la température.

Ceci conduit au fait que les problèmes de combustion sont mathématiquement « raides ». Il en résulte des configurations comportant une grande variété d'échelles spatiales et temporelles et un caractère multi-échelles très marqué.

#### **Des modes de combustion variés**

Les modes de combustion peuvent prendre des formes très variées (déflagrations, détonation, flammes turbulentes...). De plus, les phénomènes doivent être envisagés en configuration géométrique tridimensionnelle très souvent d'une grande complexité dans les applications pratiques, dans des conditions instationnaires et, dans beaucoup de cas, dans des milieux hétérogènes ou en présence de plusieurs phases. Dans certains cas la géométrie elle-même varie dans le temps comme dans les moteurs à piston. La combustion est aussi souvent effectuée sous pression, la pression pouvant prendre des valeurs extrêmes comme dans les moteurs aéronautiques les plus avancés, les moteurs fusées ou les moteurs à piston. Lorsque l'injection de l'un des réactifs est effectuée à basse température mais dans un environnement à très haute pression (cas de l'oxygène liquide dans les moteurs cryotechniques par exemple), les conditions sont transcritiques et il faut tenir compte des effets de gaz réel et des anomalies des phénomènes de transport. Une telle complexité nécessite de mener de pair des études sur des problèmes très fondamentaux dans des configurations simples et d'autres plus appliquées sur des systèmes plus proches de la réalité pratique.

#### **De larges domaines d'application**

Les domaines d'application concernent les moteurs à piston, les foyers aéronautiques, les chambres de combustion des lanceurs spatiaux ; les systèmes de production d'énergie, tels que les foyers industriels, les turbines à gaz, les fours, les procédés d'élaboration de matériaux ; les explosions (accidents industriels ou applications militaires) et la sécurité

(conception de procédés chimiques); les incendies et les feux (en milieu industriel ou forestier); la formation, la dispersion et le traitement de polluants.

### **Participation de la communauté combustion au défi énergétique et climatique**

Les processus de combustion doivent être largement améliorés et optimisés afin de répondre aux problèmes environnementaux et économiques que représentent les émissions de polluants et l'épuisement des réserves des énergies fossiles. La recherche en combustion a ainsi pour objectifs principaux la diminution de la consommation de combustibles et la réduction des émissions polluantes, avec en particulier les gaz à effet de serre.

La recherche en combustion doit bien sûr développer des technologies et des procédés innovants pour pallier l'épuisement des réserves énergétiques mais elle doit également contribuer au développement de solutions afin de préserver de façon durable la qualité de l'environnement, réduire les impacts sur la santé et relever le défi du changement climatique.

## **4.2 LES AXES DE RECHERCHE EN COURS ET À VENIR**

La complexité des processus de combustion nécessite le développement conjoint d'analyses théoriques, d'expérimentations, de modélisations et de simulations numériques, impliquant souvent différents champs disciplinaires. Les thèmes à développer sont très vastes :

- développement de nouveaux modes de combustion, de nouveaux carburants, de nouveaux modèles (cinétiques, numériques) ;

- modélisation de la dynamique de la combustion ; les instabilités, les couplages et les régimes transitoires (allumage, extinction,

variations cycliques, démarrage à froid, flash-back...);

- contrôle de la combustion et des systèmes réactifs (par ex, combustion assistée par plasma, laser, micro-onde) ;

- bruit de combustion, effets mécaniques et acoustiques générés par les flammes ;

- les systèmes d'injection ; la combustion diphasique ;

- les systèmes de combustion avancée ; la combustion à haute pression, l'injection et la combustion transcritique, les nouveaux modes de propulsion (combustion supersonique, propulsion par onde de détonation), les agents propulsifs ;

- détonation, prédiction de la transition déflagration/détonation dans des installations industrielles complexes ;

- combustion aux interfaces. Échanges et transferts dans les matériaux hétérogènes, poreux. Modélisation associée ;

- schémas cinétiques pour des espèces et des combustibles de plus en plus complexes avec l'utilisation des méthodes de tabulation et de la mécanique quantique ;

- traitement des déchets, propagation des feux de forêts, initiation et propagation des détonations, etc.

### **Sur le plan expérimental**

On assiste à un développement permanent de techniques de diagnostics optiques en vue de l'étude du couplage combustion/turbulence.

Il s'agit d'effectuer des mesures instantanées non intrusives, multidimensionnelles, multiscalaires et en temps réel (PIV et LIF essentiellement). L'essor de diagnostics quantitatifs comme le CRDS ont contribué au développement de mécanismes chimiques détaillés. Dans l'avenir, il faudrait favoriser, *par exemple par le biais de plateformes ou d'écoles thématiques*, le transfert de compétences et de maté-

riel au sein de la communauté combustion mais aussi « plasmas » et « mécanique des fluides ». Un autre besoin concerne le développement d'installations de combustion représentatives des conditions de température, pression, etc. rencontrées en particulier dans les moteurs aéronautiques, spatiaux et automobiles, mais aussi dans les chaudières, et l'application de mesures quantitatives et de méthodes de traitement permettant une comparaison détaillée avec les simulations numériques, en particulier aux grandes échelles.

## Sur le plan simulation

Des simulations numériques de plus en plus complètes permettent de représenter des systèmes de complexité croissante en profitant des possibilités nouvelles offertes par les codes et méthodes de calcul, par l'augmentation constante des puissances unitaires des processeurs et par les progrès réalisés dans le domaine des architectures des ordinateurs rendant possible la parallélisation des méthodes de résolution. Les recherches concernent principalement le développement de simulations aux grandes échelles, et leur application à l'analyse de la dynamique de la combustion dans des configurations simples, mais aussi de façon croissante dans des géométries réelles. La simulation aux grandes échelles permet désormais d'aborder des problèmes difficiles d'interaction et de couplage avec l'acoustique dans des turbines à gaz réelles, ou d'étudier les variabilités cycliques et leurs origines dans les moteurs à piston. De façon générale ce type de simulation trouve un large champ d'application pour l'étude de flammes turbulentes en interaction avec des phénomènes tels l'acoustique, le rayonnement ou les pulsations, rencontrés dans les moteurs fusées ou les centrales nucléaires. L'effort en recherche pour le développement des simulations numériques concerne également les mathématiques appliquées pour la mise au point de méthodes numériques précises et performantes. L'objectif est maintenant de développer des modélisations améliorées des phénomènes cinétiques, de la combustion solide, de l'injection liquide, des méthodes de

couplage avec le rayonnement, et d'aboutir à des outils de calcul utilisables au stade de la conception et de l'optimisation de systèmes de combustion avancée. Un élément clef à cet égard sera l'accès à des moyens de calcul dédiés : calculateurs massivement parallèles, machines hybrides CPU/GPU. Un autre aspect central pourrait être l'émergence de codes de simulation communautaires, permettant de mettre en commun les développements réalisés, facilitant les collaborations interdisciplinaires ainsi que la mutualisation des efforts de développement et de maintenance. À cet égard il apparaît indispensable d'associer aux moyens matériels sophistiqués les moyens humains qualifiés en matière de calculateur et de développement et maintenance de codes.

## Répondre aux enjeux sociétaux

- nouveaux modes de combustion (combustion sans flamme, oxycombustion...) pour la séquestration du  $\text{CO}_2$  ;

- combustion de solides (notamment le charbon) et processus de gazéification du charbon avec intégration de la capture du  $\text{CO}_2$ . Carburants alternatifs aux combustibles fossiles (biomasse, déchets organiques, carburants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> génération...) solides, liquides ou gazeux (filières CTL coal-to-liquid et BTL biomass-to-liquid), combustibles hydrogénés. À ce niveau, il faut favoriser les collaborations avec les chimistes, pétroliers, et l'Institut Écologie et Environnement (INEE) en vue de la formulation de ces nouveaux carburants, de leur intérêt écologique et de leur test en condition réelle, de leur modélisation cinétique et thermophysique ;

- développer les moyens expérimentaux de caractérisation des émissions polluantes et les outils de simulation numérique associés. À ce niveau la collaboration avec la communauté « Chimie atmosphérique » est cruciale ; elle concerne à la fois la détermination de constantes de vitesse d'intérêt combustionnel et atmosphérique, la métrologie de molécules traces en général et le devenir (modélisation) des polluants dans l'atmosphère ;

– rattraper le retard en matière de caractérisation des nanoparticules à la source et en champ proche. Favoriser les interactions avec d'autres champs disciplinaires (santé, chimie atmosphérique...) et les collaborations avec les laboratoires étrangers avancés dans le domaine.

– sécurité des installations industrielles et nucléaires, incendies et feux de forêt. Risques incendie/explosion/détonation. Favoriser le travail interdisciplinaire avec les communautés géoscience, météorologie, sciences sociales (interface forêt/habitat)...

### **4.3 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION**

La communauté française en combustion est de taille modeste, mais bien identifiée, et sa reconnaissance internationale bien établie dans plusieurs domaines clés.

Les unités de recherche dans lesquelles le CNRS a un poids important (UPR ou UMR) jouent un rôle décisif qu'il convient absolument de préserver et de développer. Le CNRS a dans le domaine de la combustion une responsabilité stratégique particulièrement importante. Le renforcement significatif de la communauté en moyens humains est toujours l'objectif prioritaire. Il est motivé par trois raisons principales : (1) permettre à la communauté française en combustion d'assumer sa place dans la communauté internationale, car le nombre de ses chercheurs est déséquilibré par rapport à sa reconnaissance et ses potentialités ; (2) faire face aux demandes croissantes de l'industrie, dont la résolution de problèmes de plus en plus difficiles nécessitent des recherches fondamentales, des expériences bien contrôlées et des simulations complexes ; (3) traiter suffisamment à l'avance le problème du renouvellement des chercheurs, ingénieurs et techniciens, car la pyramide des âges laisse présager des situations difficiles qui, dans le cadre d'une communauté à effectifs réduits, peut conduire à l'arrêt de thématiques d'impor-

tance si ces situations ne sont pas traitées à temps. En conséquence, le CNRS doit privilégier une politique de recrutement de chercheurs et d'ingénieurs et techniciens.

Les actions permettant la fédération et la structuration de la communauté en combustion, en liaison avec les partenaires industriels et les autres organismes doivent être poursuivies. C'est réellement pour cette communauté à effectifs réduits que des instruments tels que GDR ou autres (plateformes expérimentales, écoles thématiques, outils numériques communautaires) doivent être mis en œuvre. Dans ce but il faut faciliter les collaborations aux interfaces avec d'autres communautés, par exemple : – la communauté « chimiste », en ce qui concerne les moyens de production de combustibles de nouvelle génération, biocombustibles, micro-algues etc, l'utilisation de la mécanique quantique dans la cinétique ; – les communautés « santé » et « chimie atmosphérique » pour des études d'impact des nanoparticules, et polluants gazeux ; – la communauté « géosciences » pour les problèmes liés à l'impact des feux ; – la communauté « procédés » pour l'étude des systèmes hybrides (solaire – turbine, pile à combustible – turbine).

## **5 – TRANSFERTS THERMIQUES**

### **5.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT**

La thermique est la branche de la physique relative à l'une des formes les plus usuelles de l'énergie : la chaleur. Elle traite de tous les phénomènes liés à son transfert, entre milieux matériels ou en leur sein, sous l'action de différences de températures ou de sources de chaleur. Tout en ayant sa propre spécificité à travers les différents mécanismes de transferts, la thermique est une science très souvent associée à d'autres champs disciplinaires. On peut effectivement souligner ses interactions et ses

couplages avec la mécanique des fluides, la mécanique des solides, le génie des procédés, la chimie, la science des matériaux, la combustion, les sciences de la terre, la biologie, ou la médecine. La thermique peut se définir comme la science des couplages, entre différents modes de transferts, à différentes échelles spatiales et temporelles

La prise en compte d'une interdisciplinarité s'impose alors, comme par exemple pour la description des sources chimiques (combustion, polymérisation), électrochimique (cœur de pile à combustible), physique (trempe, élaboration de matériaux), mécanique (frottement, dissipation visqueuse), biologique (croissance bactérienne, hyperthermie), médecine (brûlures)...

Les recherches menées dans le domaine des transferts thermiques sont motivées par de nombreux enjeux de société : solaire concentré, émissions polluantes dans les systèmes combustifs, imagerie médicale, climatologie, planétologie, systèmes embarqués (refroidissement de l'électronique dans le transport ferroviaire, automobile, aéronautique et spatial), procédés industriels, biologiques, lutte contre les feux, intensification des transferts, efficacité énergétique, thermique des bâtiments, nouvelles énergies, ITER... D'une façon générale, la thermique devient un facteur incontournable pour gérer l'énergie, optimiser et contrôler les systèmes industriels, concevoir des matériaux nouveaux...

Il s'agit également d'une science particulièrement propice au développement de nouveaux concepts théoriques ou méthodologiques, tels les méthodes de changement d'échelles, les méthodes inverses, les outils stochastiques et la réduction de modèles.

Lors de ces dix dernières années, on a ainsi assisté à un développement très important de l'analyse et de la compréhension de processus thermiques très divers, grâce aux progrès combinés de la modélisation et des techniques expérimentales : l'un des points forts de la thermique, en France tout particulièrement, est d'avoir su préserver une place conséquente à l'expérimentation.

Différents axes de recherche peuvent être identifiés :

– **les transferts dans les milieux complexes** : Un grand nombre de situations pratiques où se posent des problèmes de transferts concernent des milieux complexes : milieux hétérogènes, poreux, divisés, granulaires, avec changement de phase, fluides supercritiques, écoulements diphasiques bouillonnants, couches limites diphasiques, transferts de chaleur à hautes températures et hauts flux dans les fluides et les matériaux etc. Les transferts de chaleur et de masse aux interfaces et aux discontinuités (solide-fluide, solide-solide, ligne de contact...) ont eux aussi de nombreuses applications. Du point de vue de la modélisation cela conduit à développer des méthodes de changement d'échelle élaborées permettant de conserver des informations sur la physique fine lors du passage à un niveau plus macroscopique. Du point de vue expérimental, il faut développer des méthodes globales et non intrusives ;

– **les transferts à micro- et nano-échelle** : en parallèle aux développements de la micro-fluidique s'ouvre tout un domaine impliquant les transferts à petite échelle : micro-mélange, micro-caloducs, micro-échangeurs de chaleur, impliquant en particulier de revisiter les transferts avec changement de phase dans un contexte où les phénomènes surfaciques peuvent dominer les phénomènes volumiques ;

– le développement rapide des techniques de fabrication d'objets nano-structurés (processeur, NEMS, lab-on-a-chip...) a provoqué l'émergence de nouvelles thématiques de recherche, telle la nanothermique. En effet, aux petites échelles spatiales, les processus physiques mis en jeu ne sont plus les mêmes qu'à échelle macroscopique. Les échanges de chaleur doivent être appréhendés et mesurés avec des outils et concepts adaptés.

Des simulations originales décrivant le transfert d'énergie par conduction et par rayonnement (dus respectivement aux phonons et aux photons de champ proche) sont développées ainsi que des moyens d'investigation

spécifiques (microscopie AFM, SThM). Ce domaine ouvre de nouvelles perspectives pour le contrôle des résistances thermiques de contact par nanostructuration d'interfaces, pour l'exaltation des transferts de chaleur à échelle sublongueur d'onde, le contrôle des flux rayonnés/absorbés par une surface ou encore l'optimisation d'absorbeurs et de filtres pour la conversion d'énergie thermophotovoltaïque.

– **les transferts couplés à échelles multiples** : La modélisation fine des transferts (de chaleur, de masse, de charges électriques) dans des milieux ou des systèmes de plus en plus complexes, éventuellement en mouvement (milieux poreux, circuits micro/mini fluidiques, multimatériaux, matériaux composites, nouveaux matériaux pour l'énergie, cœurs de pile à combustible, sprays interagissant avec des parois, échangeurs multifonctionnels...) exige de repousser de plus en plus loin les conditions aux limites (conjugaison des transferts) et de prendre en compte les couplages. Le spécialiste des modèles de transport doit donc revisiter l'écriture de ces derniers, en cohérence avec l'échelle d'observation retenue.

Les verrous précédents peuvent être levés par l'emploi d'approches de changement d'échelle (homogénéisation, prise de moyenne...) ou de réduction physique de modèle. Le développement de nouveaux capteurs multiphysiques multi spectraux (UV, fluorescence...) et de techniques de dépouillement associées doit permettre de multiplier les moyens d'investigation des phénomènes de transfert étudiés. La mise en œuvre de techniques analytiques de modélisation permet la caractérisation expérimentale structurelle (paramètres thermophysiques) de nouveaux matériaux, fonctionnant à des niveaux de température de plus en plus élevés (applications nucléaires, turboréacteurs...) ou ayant des caractéristiques extrêmes (super-isolants). Le développement des techniques inverses permet d'identifier également ces paramètres, mais autorise aussi la mesure de grandeurs « à distance » (fluxmétrie, caractérisation de sources thermiques ou massiques, contrôle non-destructif par voie thermique, débit-

métrie...) ainsi que l'identification/réduction de modèles, permettant d'envisager des stratégies de contrôle thermique en temps réel.

Le rôle de la communauté thermicienne va augmenter dans les années à venir dans un certain nombre de domaines :

– la fusion thermonucléaire, particulièrement dans la récupération et la conversion de la chaleur dans le projet ITER ;

– la production le transport et le stockage de l'énergie, le développement des nouvelles énergies (carburants alternatifs, solaire, hydrogène et pile à combustible, systèmes hybrides) ;

– l'optimisation de la consommation énergétique dans les procédés industriels et dans l'habitat.

## 5.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

Les laboratoires de la section dans le domaine de la thermique en France émerge dans les réseaux thématiques de recherche reconnus par le CNRS et /ou le MESR : participation importante au programme Énergie du CNRS, GDR AmETH (Amélioration des Échanges Thermiques), GDR Nanothermique, GDR SYREDI, groupe METTI (Métrologie Thermique et Techniques Inverses). Cette structuration interne, permet de cultiver des relations fortes entre laboratoires du domaine. Il faut également souligner la pérennisation et le développement des sciences thermiques à travers la Société Française de Thermique qui regroupe des universitaires et des industriels. La SFT est une société savante reconnue comme très active : elle organise un Congrès annuel avec actes édités, ainsi qu'une dizaine de rencontres scientifiques sur des thématiques ciblées, en collaboration avec d'autres sociétés savantes ou groupements professionnels.

Au niveau international, la communauté thermique s'est également structurée grâce au développement de certaines conférences et

comités : International Heat Transfer Conference (IHTC), International Center for Heat and Mass Transfer (ICHMT), Comité Eurotherm, European Conference on Thermal Properties (ECTP).

Au plan national, la structuration interne des laboratoires de thermique doit s'accompagner d'un rapprochement encore plus fort vers d'autres disciplines (physique statistique hors équilibre et de la physique non linéaire, science des matériaux, biologie...). Il faut renforcer le recrutement de personnels dédiés à la pérennisation des travaux méthodologiques menés à l'interface entre différentes disciplines

(par exemple à l'interface de la thermique avec la physique, l'électronique, les matériaux, les sciences de l'univers). Il faut aussi veiller au maintien des compétences et des savoirs des laboratoires que ce soit en instrumentation et système de mesures (personnels techniques), mais aussi en modélisation et analyse fine des phénomènes locaux.

La collaboration avec les acteurs industriels ou institutionnels, concrétisée par une activité contractuelle traditionnellement importante dans nos laboratoires, doit être maintenue et aller vers des champs d'application de la maîtrise des transferts de plus en plus larges.

# 11

---

## **SYSTÈMES SUPRA ET MACROMOLÉCULAIRES : PROPRIÉTÉS, FONCTIONS, INGÉNIERIE**

*Président*

Jean-François GÉRARD

*Membres*

Thomas BICKEL  
Christophe BLANC  
Redouane BORSALI  
Élodie BOURGEAT-LAMI  
Isabelle CANTAT  
Christophe CHASSENIEUX  
Henri CRAMAIL  
Renaud DEMADRILLE  
François EHRENFELD  
Christine GOURIER  
Laurent HELIOT  
Anne JONQUIERES  
Jean-François LEGRAND  
Zohair MISHAL  
Michel RAWISO  
Philippe RICHETTI  
Jean-Jacques ROBIN  
André SCHRODER  
Cécile SYKES  
François TOURNILHAC

### **AVANT-PROPOS**

Les membres de la Section 11 auraient aimé consacrer plus de temps à la réflexion et rédaction de ce rapport de conjoncture et de perspective. Les délais de production de ce document ne leur ont pas permis de pouvoir travailler complètement les éléments de bilan et de recommandations qui leur semblent essentiels. La Section suggère qu'à l'avenir, ce rapport soit demandé dans la dernière année de mandature des sections du Comité National afin de leur permettre, à travers le travail d'évaluation d'une plus grande partie des chercheurs et d'analyse des activités des unités auxquelles ils appartiennent, de mieux connaître la communauté scientifique de leur Section.

### **1 – INTRODUCTION**

Il faut tout d'abord rappeler les origines de la Section 11, section souhaitée d'interface lors de sa création et qui rassemble des chimistes des polymères, des physico-chimistes et physiciens de la matière molle mais aussi des chercheurs affichés « matériaux ». Son

intitulé reprend parfaitement cette culture commune quelle que soit la communauté à laquelle les acteurs appartiennent, chimistes ou physiciens, qui est celle du développement d'approches pluridisciplinaires pour la conception d'architectures et de morphologies depuis l'échelle moléculaire de matériaux ou systèmes supramoléculaires ou macromoléculaires en vue de conférer des comportements physiques spécifiques. La Section 11 réunit des compétences de cœur comme la chimie macromoléculaire, la physico-chimie, la physique de la matière molle et la science des matériaux polymères mais a la particularité de pouvoir porter des projets de recherche aux interfaces avec d'autres disciplines comme la chimie organique, la chimie du solide, la catalyse ou la biochimie, la biologie, le génie des procédés, la mécanique, etc. Cette culture interdisciplinaire de la Section 11 est désormais bien ancrée et nombre sont les projets liant chimie d'objets moléculaires ou macromoléculaires à l'étude des comportements physiques des systèmes y compris de systèmes biologiques. Cette spécificité dans le paysage national s'appuie bien entendu sur des compétences disciplinaires scientifiques fortes et reconnues internationalement et conduisent ainsi les 310 chercheurs CNRS lui sont rattachés à être présents dans des laboratoires des Instituts de Chimie, de Physique, des Sciences Biologiques et des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes. Compte tenu des activités liées à la Section 11, de nombreux laboratoires ont une appartenance principale ou secondaire à celle-ci mais les regroupements nombreux d'unités mixtes lors des derniers contrats quadriennaux rendent difficiles leur décompte puisque les unités de grande taille créées sont très pluridisciplinaires. Le nombre d'enseignants-chercheurs travaillant dans le champ en Section 11 est donc très important.

Les principales évolutions des approches développées en Section 11 sont, comme pour beaucoup d'autres communautés, liées aux nouveaux enjeux sociétaux. En effet, on retrouvera dans la suite plus en détail des thématiques qui ont comme directe motivation ces nouvelles exigences dans le domaine de l'énergie, de l'environnement et en particulier

de la préservation des ressources naturelles, ou de la santé. Si le risque pouvait être de nuire à l'émergence de projets de recherche de rupture en limitant les questions scientifiques posées, les chercheurs se sont approprié ces nouvelles demandes en développant des travaux originaux et en revisitant des concepts et des approches qui pouvaient sembler plus traditionnels. C'est notamment le cas pour la chimie macromoléculaire qui a vu dans l'utilisation de synthons biosourcés ou dans la nécessité de développer des chimies de polymérisation avec des systèmes de catalyse ou des milieux de polymérisation plus respectueux de l'environnement, l'opportunité de repenser les outils de polymérisation et de travailler de manière accrue à l'interface avec la chimie de catalyse et la biochimie. Pour ce qui est de l'interface avec la biologie et la santé, l'évolution déjà remarquée en 2004 d'une grande partie de la communauté vers des préoccupations relevant des sciences du vivant, du diagnostic et de la thérapeutique se voit confirmée avec nombre de chercheurs et d'unités affichant ces thématiques. La tradition d'interdisciplinarité de la Section 11 sert ainsi parfaitement les projets qui, par essence, requièrent des approches associant chimie, physico-chimie, physique et biologie.

Les travaux des chercheurs de la Section 11 sont en forte interaction avec les milieux socio-économiques. Cette réalité se traduit par l'implication des laboratoires dans des contrats avec des entreprises de manière bilatérale ou soutenus par les nombreux outils de collaboration désormais proposés : projets ANR collaboratifs, pôles de compétitivité, projets européens, etc. mais aussi à travers des unités mixtes de recherche associant CNRS et entreprises ou le CEA. Un autre indicateur de son implication avec le monde socio-économique est le nombre important d'actions de valorisation (brevets ou création de start-ups). Ce constat justifie la pertinence des projets menés mais aussi la capacité, dans le champ de recherches de la Section 11, de développer une recherche fondamentale répondant aux critères d'excellence mais aussi à des applications économiquement viables.

Le présent rapport présentera tout d'abord les thématiques dites de cœur de la Section 11 (Partie 2) :

- Science de la Matière Molle
- Chimies et Architectures Macromoléculaires
- Matériaux Moléculaires et Supramoléculaires-Systèmes Fonctionnels

Les thématiques transverses, faisant appel à des expertises scientifiques diverses, dans lesquelles on retrouvera plus encore l'interdisciplinarité développée en Section 11 seront alors abordées en essayant d'identifier les objets d'études et les concepts et méthodologies adoptées (Partie 3) :

- Surfaces et Interfaces
- Théorie et Simulation
- Interface avec la Biologie

Enfin, pour chacune de ces parties, nous dégagerons les forces et faiblesses des activités et identifierons les opportunités et actions devant se mettre en place pour répondre aux enjeux de demain.

## 2 – THÉMATIQUES DE RECHERCHE DU CŒUR DE LA SECTION 11

### 2.1 SCIENCE DE LA MATIÈRE MOLLE

#### Introduction

On qualifie de molle toute matière donnant une réponse forte à une sollicitation ou un signal de commande faible. C'est aussi tout additif qui, en faible quantité, change fortement les propriétés d'usage d'un matériau. Cette matière molle s'étend des cristaux liquides aux molécules biologiques, en passant par les

polymères, les gels, les cellules vivantes, les colloïdes, les tensio-actifs, les émulsions, les mousses et les grains en suspension. Elle se retrouve dans les matériaux de tous les jours, ce qui la relie à des problèmes industriels. Toutefois, si des progrès découlent de la compréhension et de la maîtrise des lois de comportement de ces matériaux, la matière molle est aussi l'objet d'une recherche fondamentale. Il existe en effet un échange permanent entre applications et problèmes fondamentaux dans ces domaines.

La science de la matière molle concerne en France une communauté scientifique nombreuse qui va bien au-delà de celle que regroupe la Section 11 du CoNRS. Elle est toutefois au cœur des activités de cette section. Elle a atteint un niveau certain de maturité mais les scientifiques s'intéressant à des systèmes de plus en plus complexes, souvent liés à des enjeux sociétaux, des défis importants continuent à se poser. La science de la matière molle exige des connaissances et une approche interdisciplinaires, associant chimie, physico-chimie, physique et biologie.

Nous définirons dans ce qui suit les contours du domaine en considérant les objets d'étude ainsi que les concepts et méthodes associés. Nous essaierons également de préciser les avancées et les forces en présence avant de conclure en proposant quelques recommandations.

#### Objets d'étude – Concepts et méthodes associés

##### Objets d'étude

##### *Tensioactifs et cristaux liquides*

Les problématiques d'auto-organisation des petites molécules (cristaux liquides thermotropes, lyotropes, tensioactifs) sont à l'origine d'une bonne partie des activités historiques de la Section 11, tant pour la synthèse dirigée de petites molécules que dans les études structurales et physiques de mésophases. Aujourd'hui, ce domaine de recherche

a atteint une certaine maturité ce qui se traduit à la fois par un ralentissement de la recherche directement sur les thématiques centrales mais aussi un essaimage important de cette culture « cristaux liquides » vers d'autres thèmes de recherches (nano-objets, nanocomposites, systèmes vivants, cytosquelette), voire d'autres communautés (chimie du solide, électronique moléculaire par exemple) Si les activités « mésophases » et « auto-organisation » sont moins centrales, on les retrouve donc dans de multiples thématiques de recherche relevant de la section.

La synthèse dirigée était traditionnellement consacrée à la formation de mésophases originales pouvant être très complexes (phases ferroélectriques, phases cubiques, etc.). Cette démarche, moins présente après le départ de plusieurs spécialistes dans la dernière décennie, se retrouve cependant dans la synthèse contrôlée de molécules discotiques et dans la maîtrise de leurs propriétés électroniques. Des approches nouvelles ont également émergé ces dernières années. On notera ainsi l'apparition d'une nouvelle classe de thermotropes : les cristaux liquides ioniques. De nouvelles synthèses dans des milieux autres que l'eau et les milieux carbonés, comme l'assemblage de tensioactifs fluorés, sont également abordés. On peut ainsi noter l'utilisation de briques de synthèse originales comme des nanoparticules dans des mésogènes, conduisant à une organisation spontanée de ces nanoparticules. Cette dernière approche est vraisemblablement amenée à se développer en raison de l'originalité de la démarche et des propriétés optiques des matériaux ainsi générés. Des progrès sensibles ont également été observés dans la synthèse et la préparation de nanoparticules anisotropes pour créer des cristaux liquides colloïdaux (à base de cellulose, d'argiles, d'oxydes métalliques ou même de virus) et l'utilisation de ces derniers comme systèmes modèles en matière condensée.

On doit enfin noter que de nombreuses équipes, y compris en chimie du solide, utilisent de plus en plus les mécanismes d'auto-organisation dans des approches « bottom-up » pour développer des matériaux nanostructurés

ou encore des nanoparticules et nano-objets à partir d'empreintes ou templates mésomorphes, de réactions en phases micellaires, voire de cristaux liquides colloïdaux, etc.

On retrouve une évolution semblable dans les approches physico-chimiques et structurales. Les études en volume de phases simples (corps purs thermotropes, phases aqueuses de tensioactifs) laissent souvent place à la formulation et à l'étude de systèmes plus complexes que nous qualifierions de « composites basés sur des cristaux liquides ». La démarche n'est pas entièrement nouvelle, mais elle a tendance à se généraliser à de nombreux systèmes thermotropes et lyotropes permettant soit de contrôler l'orientation de particules dopantes (nanoparticules anisotropes ou nanotubes de carbone dans des mésophases par exemple), soit de modifier les propriétés des mésophases dopées (par exemple abaissement du seuil de Frederickz d'un nématique à l'aide de particules ferromagnétiques). La Section note également un regain d'intérêt pour la maîtrise de l'alignement des cristaux liquides, non plus pour des aspects traditionnels liés à l'affichage, mais en direction de l'électronique moléculaire ou organique avec en particulier l'orientation au sein de films minces de phases colonnaires pour le photovoltaïque. Il est vraisemblable que l'étude de l'alignement de mésophases soit relancée dans ce cadre.

Enfin, on doit noter que même pour les phases simples, certaines propriétés physiques et mécanismes associés ne font toujours pas l'objet d'explications satisfaisantes. Ils ont, en effet, résisté depuis longtemps à l'analyse, mais des études renouvelées à l'aide de méthodes ou d'outils innovants ont permis une meilleure compréhension. On peut ainsi noter les transitions vitreuses des phases thermotropes confinées, l'effet Lehman dans les phases chirales, le comportement rhéologique de lyotropes et leurs transitions sous cisaillement et la dynamique de l'ancrage des nématiques.

Enfin, si les recherches liées aux aspects technologiques d'affichage LCD sont maintenant très réduites en France, il reste encore de nombreuses petites niches technologiques

continuant à faire l'objet de recherches appliquées, que ce soit dans le domaine des télécommunications, des matériaux pour l'optique, des vitrages intelligents, etc. Dans le cas des tensioactifs, de nombreuses applications dans le domaine de la cosmétique, de l'encapsulation et de la vectorisation, sont présentes.

### Gels et systèmes auto-assemblés

Le domaine des gels connaît un renouveau notamment en raison de la mise en œuvre des méthodes de polymérisations radicalaires contrôlées qui permettent d'obtenir des microgels, voire des nanogels, avec des propriétés différentes de leurs homologues macroscopiques en raison des échelles de longueur mises en jeu. Le but est souvent d'induire des changements conformationnels de ces objets via des stimuli extérieurs (pH, force ionique, température, rayonnement) de manière à disposer de matériaux stimulables ou activables. Un effort important est mené pour substituer les monomères classiques par des molécules d'origine naturelle principalement les polysaccharides ou par des homologues biodégradables. Ces micro-nanogels sont souvent utilisés comme matrices hôte de charges inorganiques (ferrofluide, QD) ou de molécules hydrophobes, le polymère jouant alors le rôle de véhicule ce qui conduit à des systèmes intéressants en galénique.

La structure chimique des gels ne cesse de se complexifier. On peut par exemple associer au sein d'un même réseau un monomère organique et des nœuds de réticulation inorganiques (oxydes colloïdaux, argile, clusters métal-oxo POSS...). Les gels hybrides ainsi élaborés présentent des propriétés mécaniques spectaculaires (résistance à la compression, déchirure, adhésion...). On peut également associer deux partenaires incompatibles et tirer profit de la microséparation de phase pour texturer les gels (cas des gels à base de protéines et de polysaccharides ou de type IPN). Généralement, le solvant considéré est l'eau, mais les liquides ioniques font leur apparition depuis peu et sans nul doute, dans les années à venir, se présentera la nécessité de

recourir aux polymères pour contrôler les propriétés rhéologiques de ces fluides complexes.

Dans le domaine des systèmes auto-assemblés, les copolymères à blocs continuent d'être présents. De la même manière que pour les gels, la prise en considération lors de la synthèse de blocs biosourcés ou biocompatibles et/ou biodégradables a été largement amorcée. D'un point de vue fondamental, les copolymères à blocs continuent à poser des questions fondamentales notamment en ce qui concerne leurs propriétés d'auto-assemblage en solvant sélectif puisqu'elles semblent être contrôlées plus cinétiquement que thermodynamiquement. Néanmoins, les phases organisées de copolymères à blocs à l'état fondu ou en solution constituent des matrices de choix pour organiser à leur tour des nanoparticules inorganiques ou plus simplement permettre leur manipulation dans des milieux d'intérêt. Dans ce dernier cas, les formulations peuvent devenir complexes et faire intervenir un nombre important de composants (copolymères à blocs, tensioactifs, polyélectrolytes). Elles nécessitent de faire appel aux techniques de diffusion de rayonnement et donc aux grands instruments pour être caractérisées. De nouveaux outils d'analyse et de simulation des spectres de diffusion (Monte-Carlo inverse) ainsi obtenus ont dû être élaborés pour décrire au mieux ces assemblages hybrides complexes aussi bien à l'état fondu qu'en solution. Les systèmes auto-assemblés sont souvent valorisés comme agents de contrôle des propriétés rhéologiques des fluides complexes. À ce titre, la rhéophysique s'intéresse de plus en plus aux couplages structure-cisaillement en élaborant des outils de mesure des champs locaux de vitesse ou en utilisant la milli- et microfluidique.

En dernier lieu, il faut mentionner les gels du cytosquelette ou gels d'actine qui ont des propriétés viscoélastiques, c'est-à-dire présentent un comportement élastique aux temps courts (< min) et visqueux aux temps longs. Ils ont de plus la capacité de s'assembler et se désassembler en fonction du temps. Leurs propriétés mécaniques peuvent être ainsi mesurées sur des cellules ou dans des systèmes *in vitro*. Dans la cellule, ces gels répondent à une

signalisation mécanique et se renforcent dès qu'une perturbation a lieu. Aussi, la compréhension des gels du cytosquelette nécessite le développement de modèles génériques de contractilité hors-équilibre. À la fois théorie et expériences dévoileront les mécanismes génériques de tels systèmes hors-équilibre.

Les auto-assemblages dynamiques de petites molécules ou de macromolécules constituent des objets d'étude pour lesquels de plus en plus d'intérêt est porté de par leurs applications potentielles dans de nombreux domaines, des matériaux stimulables et adaptatifs aux biomatériaux, en passant par des matériaux à propriétés rhéologiques contrôlées. Ceux-ci utilisent les interactions spécifiques de la chimie supramoléculaire et se fondent à la fois sur la monodirectionnalité de ces liaisons pour obtenir des assemblages de dimension contrôlée mais aussi sur leur réversibilité pour mettre en place un processus d'autoréparation. Suivant l'intensité des interactions, ou de la constante d'association, on distingue les systèmes auto-assemblés à l'équilibre thermodynamique, et réellement auto-réparant, des systèmes auto-organisés hors-équilibre, traversés par des flux et capables d'augmenter leur complexité de manière autonome. Les dynamères développés par J.-M. Lehn sont des exemples de ce type de systèmes. Les organogélateurs ou hydrogélateurs, qui sont des gels de petites molécules, en sont d'autres. Des études structurales sont alors essentielles mais il est très rare que l'on comprenne parfaitement l'assemblage à la résolution moléculaire, leur caractérisation étant faite plutôt à l'échelle macromoléculaire (rubans, hélices, nanotubes). La dynamique de ces systèmes est aussi un sujet d'étude. Les mécanismes gouvernant leur formation restent en effet relativement mal compris (contribution thermodynamique vs. contribution cinétique) et très souvent dépendent de l'histoire de l'échantillon. Les gélateurs sont très utilisés comme agents rhéo-modifiants dans les industries des revêtements et des lubrifiants. Au plan académique, une évolution vers l'étude des systèmes stimulables par des facteurs physico-chimiques ou biologiques (par exemple, des gels capables de se former en présence

d'une enzyme) est observée. Le nombre de gélateurs gélifiant l'eau augmente, ce qui permet d'adresser des applications biologiques et en particulier dans la galénique. Les organogélateurs peuvent également être considérés comme gabarits ou supports par exemple pour la catalyse ou pour orienter des nanoparticules. Finalement, ils peuvent servir de gabarit pour la fabrication de systèmes mésoporeux, si l'on parvient à leur procurer une orientation. Les auto-assemblages de lipides et peptides (assemblages biomimétiques) conduisent aussi à des rubans torsadés ou des nanotubes, soit des morphologies semblables à celles qui sont observées avec les organogels et relèvent de la même problématique. Les copolymères à blocs reliés par des connections réversibles ou « dynablocks » constituent par ailleurs un nouveau type d'auto-assemblages dynamiques. Ces systèmes s'étudient à l'intérieur de collections (chimie combinatoire dynamique appliquée à des systèmes mésos-structurés) et sous l'influence de différents stimuli. Ils sont susceptibles d'exprimer séquentiellement un grand nombre de mésophases à partir d'un petit nombre de constituants de base, et de présenter des propriétés d'autoréplication au sein d'assemblages dynamiques. Ces mésophases peuvent aussi être utilisées pour de nombreuses applications.

Dans le domaine des polymères, il reste une activité de recherche qui concerne la structure des polymères et copolymères cycliques, ramifiés en forme d'étoile ou de peigne et dendronisés. Il en est de même avec les poly-électrolytes, qu'ils soient modèles comme l'ADN, naturels ou de synthèse. Les polymères ou copolymères conjugués, semi-conducteurs ou conducteurs, sont des constituants essentiels pour certaines applications notamment en électronique organique. Cela justifie une caractérisation précise des propriétés intrinsèques des molécules et de leurs assemblages mais dans ce domaine, des progrès sont encore à faire. Les polymères et copolymères dans les liquides ioniques quant à eux constituent des sujets émergents. Ce sont aussi les problèmes de confinement de macromolécules et en particulier leur conséquence sur leur dynamique (transition vitreuse) ou de transitions de phase

induites par le confinement qui sont abordés en considérant différents systèmes modèles (diffusion d'une chaîne sur une surface, confinement d'ADN dans des mésophases, films suspendus et minces...). Il existe de très belles expériences permettant de suivre le processus de dépliement d'une protéine. Les problèmes de cristallisation de polymères (processus de germination dans les polymères semi-cristallins, cristallisation 2D) continuent d'être étudiés. Le phénomène de cristallisation sous contrainte mécanique a des conséquences considérables dans la tenue mécanique des élastomères. Mais, ce sont les systèmes mixtes ou multichargés polymères-tensioactifs, poly-électrolytes-particules de charge opposée, ou polymères -colloïdes, polyplexes, qui font l'objet d'une recherche fondamentale plus importante aujourd'hui. Les applications sont en effet nombreuses car ces systèmes interviennent dans la formulation des fluides de grande diffusion (cosmétiques, peintures, boues de forage) et des vecteurs pharmaceutiques. De surcroît, ils ne sont pas aussi bien caractérisés par des équations d'états ou des lois de comportement que les systèmes binaires comportant des particules dans un solvant. Finalement, ils peuvent conduire aux nanocomposites polymères-particules qui ont des propriétés d'usage essentielles. Les nanocomposites modèles du type silice-polymère permettent ainsi de contrôler la structure à l'échelle du nanomètre et la topologie afin de modifier et de comprendre leurs propriétés mécaniques. D'autre part, les associations colloïdes donneurs d'électrons et polymères ou copolymères accepteurs pourraient aussi fournir une solution pour le photovoltaïque.

### *Milieus divisés, surfaces, interfaces et films*

Les milieux divisés, ou dispersés, recouvrent les colloïdes, les composites ou les poreux, les émulsions, les mousses, les granulaires, les pâtes, etc. Ce sont des systèmes formés d'au moins deux phases et qui ont les propriétés des interfaces qui les composent. On peut distinguer les systèmes divisés en volume et les systèmes divisés aux interfaces. En volume, la plupart des travaux s'intéressent

à la rhéologie et au vieillissement de ces systèmes. Pour les émulsions, les mousses et les granulaires, les points importants sont les écoulements et la transition de blocage ou « jamming ». Des progrès ont été réalisés grâce à l'utilisation de la vélocimétrie par imagerie par RMN (vélocimétrie IRM) et la vélocimétrie ultrasonore Doppler (VDU) pour la détermination des champs de vitesse. Dans le domaine des granulaires, la recherche porte aussi sur les effets précurseurs des écoulements de type avalanches. On peut remarquer que tous les problèmes théoriques concernant les écoulements ne sont pas résolus. Par exemple, dans le cas des mousses, la dissipation reste un phénomène non élucidé. Par contre, les effets de vieillissement commencent à être assez bien compris. En ce qui concerne les colloïdes et les systèmes mixtes colloïdes-polymères, la rhéologie est évidemment cardinale. Celle des fluides complexes en régime concentré l'est aussi, avec en particulier les phénomènes de fracturation et de cicatrisation des gels.

Avec les systèmes divisés, il est nécessaire de prendre en compte le volet formulation qui comporte la stabilisation par addition de nanoparticules. Ces dernières modifient les propriétés interfaciales et ont la propriété d'être stimulables sous l'effet de la lumière, d'un champ électrique ou magnétique ou d'un changement de température. La microfluidique s'est bien développée ces dernières années et évolue vers une microfluidique digitale (gouttes ou petits réacteurs permettant une analyse statistique). Elle soulève aussi la question du comportement rhéophysique des fluides complexes en situation de confinement. Cette problématique est reliée à l'étude des phénomènes de glissement au voisinage de surfaces, et donc à la tribologie. Finalement, la microfluidique constitue désormais un outil essentiel pour la caractérisation à haut débit, tout en permettant de traiter des problèmes d'hydrodynamique spécifiques comme l'étude de la physique associée à la dynamique d'encombrement (phénomène de colmatage), en simulant un milieu poreux modèle à deux dimensions.

Dans le domaine des surfaces, interfaces et films, les contributions sont majeures et

reconnues internationalement, tant du point de vue théorique que du point de vue expérimental. Elles bénéficient de compétences et d'une solide culture sur le mouillage, le confinement, les mésophases, les émulsions et les membranes. Les recherches consacrées aux surfaces et interfaces sont toutefois reliées principalement aux besoins d'innovation technologiques et aujourd'hui aux nanotechnologies. Les applications nécessitent des surfaces ou interfaces bien structurées, périodiques ou aperiodiques, avec une ou plusieurs fonctionnalités. Pour cet ensemble de caractéristiques, il faut évidemment développer une approche pluridisciplinaire. Dans l'ingénierie des surfaces, l'utilisation des auto-assemblages de copolymères à blocs semble ainsi émerger comme voie de mise en œuvre innovante mais, ce sont probablement des combinaisons des méthodes lithographiques («top-down») et des auto-assemblages («bottom-up») qui seront utilisées dans l'avenir afin de contrôler des propriétés telles que le mouillage, l'adhésion, la friction, l'indice de réfraction, etc. Pour la fonctionnalisation de surfaces solides, mais aussi de nanocapsules, c'est le dépôt de multicouches de polyélectrolytes couche par couche (LBL) par trempage ou pulvérisation qui devient la technique la plus utilisée. Sa simplicité et la possibilité de disposer de multicouches multi-fonctionnalisées la rend très attractive pour l'élaboration de biomatériaux. Elle permet aussi de préparer des films stimulables. De nouveaux procédés de traitement de surface, qui semblent plus simples, comme la croissance de couches hybrides, sont toutefois proposés. Ils seront sans nul doute explorés dans l'avenir.

Sur le plan fondamental, des études sur la friction et l'adhésion de surfaces nanostructurées et de films moléculaires confinés ont été réalisées. L'utilisation d'une technique de mesure de force spécifique, le SFA-nanotribomètre, a permis d'étudier les propriétés tribologiques de films moléculaires en relation avec leur structure. Des résultats originaux ont ainsi été obtenus dans l'évolution dynamique de films mixtes de copolymères associatifs et de tensioactifs ainsi que dans l'étude de l'influence de la rugosité sur les forces de frotte-

ment entre surfaces décorées. En ce qui concerne les matériaux polymères en couches minces, des études sur le mécanisme de séchage des films sont à remarquer.

Les membranes correspondent à des matériaux perméables et sélectifs alors que les matériaux barrières font, au contraire, barrière à la migration d'un constituant spécifique. Le domaine des membranes est évidemment riche en applications : perméation gazeuse, notamment capture du CO<sub>2</sub>, piles à combustibles à membrane Nafion®, rejets aqueux et dessalement de l'eau de mer, etc. L'élaboration et l'étude de membranes et films barrières apparaissent en émergence (barrière au CO<sub>2</sub>, aux hydrocarbures, ignifugation...) et retiennent une grande attention actuellement. La physique de la matière molle a par ailleurs trouvé à partir des années 1970 un intérêt particulier dans l'étude des membranes de phospholipides. Ces systèmes, simples à mettre en œuvre, se sont en effet avérés être de parfaits modèles de liquides à deux dimensions. Les théoriciens ont ainsi développé des modèles du comportement thermodynamique de ces membranes que les expérimentateurs ont validés. Aujourd'hui, l'intérêt pour les membranes de phospholipides concerne principalement leur comportement hors équilibre (sous cisaillement, saut de chaleur ou de tension...) Un petit nombre d'équipes, reconnues dans le domaine, travaillent sur ces sujets, qui restent des niches. Cependant, la dernière décennie a vu naître un engouement pour ces systèmes en tant qu'objets biomimétiques d'une part (la membrane se voit attribuer un rôle similaire à une membrane biologique dans un environnement complexe comportant des protéines par exemple) et bio-inspirés d'autre part (la membrane est utilisée comme brique de base pour la construction d'édifices complexes à visée biocompatible).

## **Concepts et méthodes associées**

### *Concepts*

Les concepts sur lesquels s'appuient l'étude et la compréhension de la matière

molle restent centrés sur l'auto-assemblage de briques élémentaires dont on cherche à contrôler les interactions afin de structurer la matière à différentes échelles de longueur et de temps. Ils ne sont pas systématiquement spécifiques et empruntent à d'autres domaines, comme la physique statistique, les transitions de phase, la rhéophysique ou la physique non linéaire. La multiplicité des échelles spatiales et de temps est la caractéristique essentielle de la matière molle. Les grandes avancées de ces dernières années ont été principalement réalisées aux échelles mésoscopiques ou nanoscopiques. Devant l'intérêt grandissant pour les systèmes mixtes, les systèmes sous champ, les propriétés mécaniques et certains processus biologiques, l'échelle de la molécule et l'échelle macroscopique devraient toutefois jouer un rôle plus important.

De nouvelles considérations se font jour, notamment le biomimétisme et la bioinspiration, les couplages structure-écoulement, la vectorisation et le vieillissement. Les systèmes bio-inspirés correspondent à des assemblages de macromolécules dont on étudie la structure, à l'équilibre ou hors-équilibre, afin de tester des modèles théoriques et de comprendre les modèles biologiques, ces systèmes n'étant pas actifs. On peut ainsi citer les multicouches de polyélectrolytes et les whiskers de cellulose. Par contre, les systèmes biomimétiques sont des systèmes reconstruits, avec un nombre réduit de constituants, qui visent une fonction particulière. Les moteurs moléculaires et les membranes (pour les propriétés mécaniques) sont ainsi des exemples de tels systèmes biomimétiques.

Les couplages structure-écoulement sont essentiels pour les formulations. Ils se situent à la frontière entre la physique fondamentale et la physique appliquée. Les écoulements conduisent les systèmes loin de l'équilibre et peuvent entraîner des changements structuraux importants, voire irréversibles. À l'échelle macroscopique, ils peuvent conduire à des ségrégations, des instabilités et des fractures. Le couplage structure-force, ou conformation-force, à l'échelle de la molécule unique, est fondamental en biophysique.

L'importance de la vectorisation résulte de ses nombreuses applications, en pharmacologie, agroalimentaire et cosmétologie. Il s'agit d'encapsuler ou de fabriquer des complexes, si possible réversibles et non toxiques, qui permettent de transporter et libérer à des endroits précis des molécules actives, des protéines ou des oligonucléotides. La thérapie génique vise ainsi à introduire une protéine ou un fragment d'ADN dans le noyau de la cellule. Dans ce domaine, la matière molle joue un rôle important (utilisation de tensioactifs, polyélectrolytes, liposomes, polymersomes, multicouches de polyélectrolytes). Un premier enjeu est la maîtrise de la physico-chimie de la formation des complexes. Un second est la fabrication de vecteurs non toxiques, pouvant être utilisés *in vivo*.

Les propriétés de certains matériaux évoluent dans le temps. Ces matériaux ont une histoire et l'on parle de vieillissement. Cette évolution peut être arrêtée et l'on peut même rajeunir certains matériaux via un traitement thermique ou mécanique. Ces effets de vieillissement ont été principalement étudiés sur des milieux divisés, comme les pâtes. Ils peuvent toutefois être observés sur d'autres systèmes, comme les auto-assemblages de petites molécules et de macromolécules ou les complexes.

## Méthodes

Sur le plan théorique, les méthodes sont celles de la physique statistique et stochastique des milieux hétérogènes, les modélisations moléculaires et les simulations numériques.

Sur le plan expérimental, il s'agit d'obtenir des informations sur les systèmes dans une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Les méthodes continuent donc à faire appel aux techniques de diffusion de rayonnement et de réflectivité (lumière, rayons X et neutrons), aux microscopies (optique, confocale de fluorescence, électronique après cryofracture et cryodécoupage, en champ proche, optique en champ proche, à deux photons) et à la rhéophysique, qui a connu des développements importants relatifs à la mesure de champs de vitesse locaux et à la microfluidique.

dique. Les mesures thermodynamiques (microcalorimétrie, mesures de tension superficielle, de force avec la technique SFA et de pression de disjonction) sont évidemment utiles dans de nombreux cas. La technique SFA-nanotribomètre, ou SFA-friction, est plus spécifique aux recherches dans le domaine de la nanotribologie. Finalement, la tomographie de matériaux composites peut être réalisée par utilisation des rayons X, des ultrasons ou de la RMN. La tomographie par absorption de rayons X mous (dans la fenêtre d'énergie où l'eau est transparente) devrait se développer dans l'avenir et serait une technique d'imagerie beaucoup plus fiable que la microscopie électronique après cryofracture et cryodécapage.

Enfin, il faut souligner la microscopie STED (« Stimulated Emission Depletion » ou déplétion par émission stimulée) ou de fluorescence à balayage permettant d'atteindre des résolutions de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, les techniques de lithogravure (microélectronique à plus petite échelle), les microfabrications, qui constituent une évolution de la microfluidique, et les microgravures, la photolithographie, les techniques permettant de réaliser des surfaces structurées sous champ et la nanofabrication utilisant des faisceaux d'ions.

## Conclusion & recommandations

L'école française de la matière molle s'est imposée par une très forte activité et des recherches reconnues internationalement. La matière molle est un domaine pour lequel les applications font émerger des questions fondamentales. Inversement, les recherches fondamentales peuvent conduire à des innovations importantes. C'est aussi un domaine qui cultive l'interdisciplinarité entre chimie, physico-chimie, physique et biologie. Les thèmes de recherche sont nombreux et les succès de ces dernières années impressionnants. La science de la matière molle a ainsi atteint un niveau de maturité. Il reste toutefois de nombreux défis car les scientifiques s'intéressent à des systèmes de plus en plus complexes. Ils cherchent en

particulier à formuler, élaborer et mettre en forme de nouveaux matériaux activables ou stimulables, nanostructurés et multifonctionnels, etc. Pour atteindre ces objectifs, une très bonne connaissance des concepts et des savoirs-faires, de la science de la matière molle, sont nécessaires. Il faut en particulier maîtriser les mécanismes physiques d'auto-organisation et d'auto-assemblage. De surcroît, il faut disposer d'une collaboration étroite entre les diverses communautés. L'expertise en science de la matière molle trouve également une application dans les matériaux d'origine biologique.

Les recommandations pourraient donc être les suivantes :

- Les physiciens n'ont plus de réticences à aborder les systèmes mixtes ou hybrides. La difficulté est toutefois la synthèse des briques de base de tels systèmes. Il y a clairement un manque en chimie des matériaux (approche « top-down »).

- Dans le domaine de la vectorisation et de l'encapsulation, il y a un besoin de structuration de la communauté scientifique. Celle-ci est actuellement trop dispersée et il n'y a pas de laboratoire dédié, ni de coordination dans ce domaine. La Section 11 pourrait donc se rapprocher de la Section 16 afin de proposer une fédération ou un groupement de recherche. On peut remarquer que le domaine de l'imagerie médicale relève de la même approche. Il s'agit en effet de considérer les bons atomes ou les bonnes molécules, et de les amener aux bons endroits.

- Les études sur la molécule unique « protéine » ne sont pas suffisamment développées. Cette molécule est très différente d'une macromolécule comme l'ADN car elle n'a pas de site cryptique. Il serait intéressant de faire une spectroscopie de force avec une telle molécule, voire de coupler force et structure.

- Finalement, on peut noter qu'il y a toujours une frontière entre chimie et physico-chimie d'une part et fonction ou propriété d'usage d'autre part. C'est la formulation, ou encore le génie des procédés, qui se trouve à cette frontière. Il serait utile que ce domaine se

renforce afin d'avoir la capacité d'aller d'un bout de la chaîne (chimie) à l'autre bout (les propriétés d'usage). Il faut donc maintenir et favoriser les approches transverses et interdisciplinaires de recherche développées par la Section 11.

## 2.2 CHIMIE ET ARCHITECTURES MACROMOLÉCULAIRES

### Introduction – Vers un renouveau de la chimie des polymères ?

La synthèse d'objets macromoléculaires les mieux contrôlés possibles en termes de topologie et de fonctionnalité reste un domaine toujours très prolifique, qui se nourrit des avancées réalisées dans la maîtrise des mécanismes et des procédés de polymérisation. L'objectif est de concevoir des polymères qui, après formulation ou auto-assemblage, donneront accès à des matériaux fonctionnels aux propriétés très diverses. Les méthodes de polymérisation ioniques vivantes et radicalaires contrôlées sont les principales voies d'accès à ces systèmes fonctionnels complexes, la voie radicalaire « contrôlée » étant maintenant couramment employée dans la plupart des laboratoires, même par les non-spécialistes du domaine qui l'utilisent comme outil.

Pour les années à venir, la chimie macromoléculaire devra pourtant évoluer en tenant compte des « contraintes environnementales » que la législation nous impose (REACH). En ce sens, l'utilisation d'une catalyse plus respectueuse de l'environnement et de ressources renouvelables – qui ne concurrencent pas la chaîne alimentaire – sont certainement deux approches complémentaires qui doivent inspirer les chimistes polyméristes pour revisiter la chimie des polymères synthétiques et ainsi développer des matériaux plus éco-compatibles. Le réflexe est maintenant pris de réfléchir en termes de cycle de vie du matériau dès lors que l'on envisage de proposer des solutions alternatives dans tous les secteurs utilisant des polymères.

La chimie macromoléculaire a sûrement beaucoup à bénéficier des nouvelles catalyses (organique, enzymatique et même métallique via l'utilisation de supports pour un recyclage aisé du catalyseur), qui connaissent actuellement un engouement en chimie moléculaire. L'apport de cette discipline à la chimie des polymères doit aujourd'hui permettre de « repenser » les grandes méthodes de polymérisation incluant les polymérisations en chaîne, les polymérisations par étapes et la modification chimique des polymères. Elle doit également permettre de répondre aux défis imposés par les nouvelles législations qui prévoient à terme l'interdiction de certains catalyseurs métalliques aujourd'hui largement employés dans la production industrielle de polymères de premier plan (PU, PET, etc.).

Quelques laboratoires sont déjà impliqués dans l'étude et l'optimisation des mécanismes de polymérisation et sont reconnus à l'échelle internationale. Les appels à projets de l'ANR en particulier et le soutien du CNRS par le biais des programmes CPDD sont des vecteurs importants qui permettent de soutenir la recherche en chimie durable des polymères. Les pôles de compétitivité AXELERA ou IAR sont également des vecteurs essentiels au développement de la thématique.

### Objets concernés/Concepts & méthodes associées

#### Objets d'étude

##### *Architectures macromoléculaires*

Parmi les architectures macromoléculaires les plus étudiées et développées, les copolymères à blocs (multi-blocs) tiennent une grande part en regard de l'intérêt grandissant de ces systèmes pour de très nombreuses applications (agents de compatibilisation, catalyse en milieu confiné, nanovectorisation, nanolithographie...). Un pan entier des recherches dans ce domaine concerne la conception de systèmes capables de répondre sélectivement à l'action d'un stimulus externe (pH,

force ionique, température, champ magnétique, etc.). Le contrôle des réactions de polymérisation combinées à des réactions dites « de ramification » (polymérisations ramifiantes contrôlées) permet également l'accès à d'autres architectures macromoléculaires plus complexes (copolymères greffés, dendrigrafts, macrocycles, nanogels, etc.); ces derniers systèmes présentant le plus souvent des propriétés physico-chimiques et rhéologiques très originales liées à leur topologie et leur fonctionnalité. Un apport substantiel récent à la synthèse macromoléculaire est liée à la «(re)naissance» de la chimie click qui permet assez souvent une synthèse plus rapide d'objets macromoléculaires complexes par le couplage entre fonctions alcynes et azoture ou entre fonctions thiol et alcène. Nombre de travaux font aujourd'hui appel à cette méthode de couplage. L'avenir nous dira si cela est un simple effet de mode ou un véritable tournant en chimie macromoléculaire.

Les concepts de chimie supramoléculaire, initialement développée au niveau moléculaire par J. M. Lehn, ont également été récemment transposés avec succès dans le domaine des polymères à architecture contrôlée et ouvrent actuellement des perspectives nouvelles dans le domaine des matériaux : polymères auto-réparants, matériaux membranaires etc.

### *Polymères bio-sourcés (synthons issus de la biomasse, etc.)*

La biomasse, ressource renouvelable, constitue une source inépuisable de synthons potentiellement intéressants pour l'élaboration de matériaux polymères dès lors qu'elle ne déplace pas les marchés destinés à l'alimentation humaine (lipides, polysaccharides, polyphénols...). L'utilisation de ces bio-ressources, encore appelée « chimie du végétal », passe inévitablement par des processus d'extraction, de captage (CO<sub>2</sub>), de purification, de cracking qui font déjà et feront encore l'objet de collaborations fortes à l'interface avec d'autres Sections du CoNRS (12, 14...). Là encore, les milieux de polymérisation, mais également la catalyse sont au cœur des recherches. Au-delà des poly-

mères traditionnels issus de la biomasse qui sont déjà au stade de la production industrielle (e.g. *poly(acide lactique)*, PLA), l'enjeu réside maintenant dans le développement de nouveaux monomères polymérisables par les voies connues mises au point dans le cas des composés pétrochimiques. Cette chimie reste encore embryonnaire en France et seules quelques équipes ont franchi le pas en misant sur des projets à risques.

### *Hybrides organiques – inorganiques*

La conception de matériaux hybrides nanostructurés alliant les propriétés des matériaux inorganiques et des polymères, continue à susciter un fort intérêt de la part de notre communauté. Il s'agit par essence d'un domaine de recherche pluridisciplinaire au carrefour de la chimie, de la physique et de la biologie avec des retombées technologiques et des applications qui dépassent largement le cadre de notre section. La modification de surface de nanoparticules inorganiques par des petites molécules organiques, des dendrimères ou des polymères constitue un axe fort de recherche qui sera amené à se développer encore d'avantage dans les années à venir. Cette fonctionnalisation permet non seulement une meilleure stabilisation et protection des nano-objets, mais elle leur confère également des propriétés nouvelles par greffage par exemple de composés fluorescents, de complexes organométalliques ou encore de molécules d'intérêt biologique. Des applications dans le domaine de l'optique (traceurs lumineux), de la catalyse ou de la biologie (sondes biologiques, vectorisation) peuvent être alors envisagées. Les méthodes mises en œuvre ici tirent largement partie des récents progrès accomplis en chimie macromoléculaire et en chimie organique (notamment la chimie «click»), mais utilisent également de plus en plus des outils et des concepts empruntés à la chimie supramoléculaire et à la chimie organométallique. Les nano-objets composites composés d'agrégats mixtes de particules organiques et inorganiques de morphologies contrôlées, obtenus soit par auto-assemblage, soit par synthèse, suscitent également un grand

intérêt. Ces clusters colloïdaux dont la forme rappelle celle de molécules simples (d'où l'appellation de « molécules colloïdales »), constituent des objets d'étude particulièrement attrayants qui présentent un fort potentiel pour la physique et soulèvent des questions fondamentales qui sont la source de réflexions à la fois pour les chimistes et les physico-chimistes. Il est possible notamment par ces approches d'élaborer des suspensions colloïdales stables de particules anisotropes qui peuvent être assemblées à leur tour en objets de dimensions supérieures. Un nouveau concept est en train de naître : celui de la chimie supra-colloïdale.

Parallèlement aux recherches menées sur les nanoparticules individuelles ou sur les agrégats de nanoparticules, un intérêt croissant est porté à l'élaboration de films minces, de multicouches ou de matériaux massifs nanostructurés obtenus par auto-organisation de nano-objets en super réseaux bidimensionnels ou tridimensionnels. Le comportement (notamment optique) de ces systèmes organisés est régi par des effets collectifs liés à l'ordre. Ainsi, les nanoparticules inorganiques sont de plus en plus combinées avec des systèmes organisés (films de savons, mésophases de cristaux liquides ou mésoporeux), qui permettent de « contrôler » cette organisation ou tiennent lieu de gabarit.

Initialement obtenues sous la forme de suspensions colloïdales, les nanoparticules peuvent également servir de base à l'élaboration de matériaux structurés par incorporation dans des matrices polymères ou dans des verres. On prendra deux exemples récents : l'élaboration de matériaux hybrides pour l'électronique organique à base de polymères  $\pi$ -conjugués et de cristaux de semi-conducteurs et la conception de membranes hybrides pour piles à combustible à base de zéolithes ou de nanoparticules de silice. À l'instar des matériaux nanocomposites à matrice polymère renforcés par des nanoparticules, des fibres, des plaquettes ou des nanotubes de carbone, qui sont toujours au cœur des préoccupations de notre section, ces nouveaux matériaux soulèvent des questions fondamentales telles que le rôle des interfaces sur les propriétés macro-

scopiques en particulier dans des conditions de sollicitations extrêmes. En outre, des efforts importants continuent à être déployés pour comprendre les mécanismes associés à la déformation de ces milieux hétérogènes et au renforcement mécanique.

Les procédés de polycondensation inorganique qui sont traditionnellement du savoir-faire de la Section 15, sont de plus en plus utilisés par les chercheurs de la Section 11. En effet, la chimie douce mise en jeu dans les procédés sol-gel de précurseurs organofonctionnels d'oxydes métalliques, est compatible avec les réactions de chimie organique et notamment de polymérisation et constitue une voie privilégiée pour la conception de matériaux hybrides à matrice polymère et nanoparticules inorganiques, de nanostructures co-continues ou de verres organo-minéraux par inclusion de petites molécules organiques. Ces matériaux peuvent être également combinés avec des nanoparticules pour l'élaboration de revêtements fonctionnels à haute valeur ajoutée (guides d'onde, films hybrides anti-réfléchissants, revêtements super-hydrophobes, anti-UV, etc.). En dépit des avancées spectaculaires réalisées dans ce domaine, des verrous demeurent quand il s'agit d'extrapoler ces approches aux milieux aqueux.

### *Chimie macromoléculaire/catalyse/contrôle*

Mise à part l'application de la polymérisation radicalaire contrôlée (PRC) via les nitroxydes et le transfert dégénératif à l'iode en milieux dispersés, ces dernières années n'ont pas vu de véritables ruptures, en France et à l'étranger, liées aux grandes méthodes de polymérisations en chaîne et à leur contrôle. Des défis restent pourtant à relever, par exemple combiner les polymérisations ioniques ou radicalaires avec les polymérisations par coordination pour l'obtention de nouveaux copolymères ou encore contrôler à l'échelle moléculaire le séquençage des unités (co)monomères dans une chaîne comme sait le faire la Nature. Quelques Laboratoires s'attaquent à ces sujets difficiles qui demandent des compétences à la frontière du périmètre

de notre section (chimie organo-métallique, etc.). Dans le cas des polymérisations par étapes, leur contrôle des polymérisations a pu être récemment réalisé dans le cas de monomères aromatiques mais beaucoup reste encore à faire avec de nombreuses retombées possibles dans les matériaux polymères de fonction (membranes, électronique, etc.)

Le développement très important de la catalyse organique en chimie moléculaire pourrait sûrement apporter un nouveau souffle à la chimie macromoléculaire. Dans ce cas, l'objectif est non seulement le contrôle des polymérisations mais également la mise au point de systèmes catalytiques plus efficaces en termes d'activité, de régio- et stéréo-sélectivité et aussi plus respectueux de l'environnement. Les normes de plus en plus strictes (REACH) imposent de mener une véritable réflexion plus globale. En ce sens, l'utilisation des catalyseurs organiques et des systèmes enzymatiques est une voie actuellement étudiée qui devrait permettre un renouveau très intéressant de la discipline.

## Procédés

### Intensification des procédés

L'optimisation et l'intensification des procédés de production est actuellement une préoccupation majeure en génie des procédés. Par intensification, on entend le développement de méthodes et de dispositifs innovants permettant une amélioration significative de la qualité de production, une diminution de la consommation d'énergie, une diminution de la production de déchets et présentant un haut degré de fiabilité et de sécurité. Cette évolution dans la manière de produire correspond à une véritable mutation de notre société et constitue un défi auquel le génie des procédés aura à faire face dans les années à venir.

### Procédés et développement durable

En matière d'éco-conception, on s'oriente de plus en plus vers des procédés « propres » respectueux de l'environnement, mettant en jeu un nombre limité de réactifs (dans un souci d'économie d'atomes) et un minimum

d'étapes. Cela nécessite d'adapter les méthodes existantes ou de développer de nouveaux procédés et méthodes d'analyse permettant de répondre à ces enjeux économiques et sociétaux (nouveaux catalyseurs plus actifs et plus sélectifs, procédés continus, analyses en ligne permettant de s'affranchir des étapes de prélèvement, procédés sans COV, polymérisations UV, etc.).

### Procédés et miniaturisation

L'intensification des procédés passe également par une diminution de la taille des réacteurs via le développement de techniques et d'appareils adaptés. Les microsystèmes sous toutes leurs formes : microréacteurs mais aussi micromélangeurs et microéchangeurs sont au cœur de ces nouveaux dispositifs et bénéficient largement des récentes avancées technologiques des procédés de microfabrication.

### Procédés et criblage haut débit

Les techniques de criblage et de synthèse haut débit qui étaient jusqu'ici l'apanage des secteurs de l'industrie pharmaceutique et des biotechnologies, sont de plus en plus appliquées aux matériaux et aux procédés. Elles permettent notamment de synthétiser et de tester en un temps record de nouveaux catalyseurs, de mettre au point des formulations complexes (peintures, encres, nanodispersions, etc.), d'optimiser des procédés de synthèse ou encore d'analyser et d'évaluer les performances d'une multitude de matériaux. L'expérimentation haut-débit repose notamment sur l'utilisation de microsystèmes et de dispositifs microfluidiques qui ont connu un véritable essor ces dernières années. Si les initiatives se multiplient dans le domaine de la catalyse par exemple, elles se font encore rares au sein de notre communauté et seront vraisemblablement amenées à se développer dans le futur.

### *Milieux (fluides supercritiques, milieux fondus, liquides ioniques, etc.)*

Les méthodes de polymérisation ou de modification des polymères ont connu récem-

ment des développements par la nature des milieux mis en œuvre. La substitution des solvants organiques par des milieux non conventionnels tels que le CO<sub>2</sub> supercritique, les liquides ioniques ou encore l'eau, demeure un des axes forts de recherche. Au-delà des effets de mode, l'obtention de polymères dont la récupération et la purification, peuvent être réalisées de manière simple sans générer de sous-produits, reste l'objectif à atteindre. Ceci nécessite parfois de repenser totalement la chimie mise en œuvre, la catalyse et, par voie de conséquence, les cinétiques réactionnelles. Dans ce contexte, la chimie sous micro-ondes permet par exemple de s'affranchir des solvants conventionnels en permettant l'obtention de polymères à hautes performances dans l'eau sous pression. La chimie en l'absence de solvant (milieu fondu, photopolymérisation en masse) est également une voie poursuivie par quelques équipes nationales renommées dans ce domaine et fortement soutenues par le milieu industriel. L'activité scientifique de cette communauté de faible effectif s'inscrit dans une démarche tout à fait d'actualité de développement de systèmes à faible émission de C.O.V. Enfin, les modifications de polymères réalisées par plasma (activation, greffage...) sont du domaine de compétences de quelques laboratoires spécialisés et parfaitement reconnus par cette communauté scientifique.

## Conclusions et recommandations

Comme on vient de le voir, la communauté des chimistes des polymères a des compétences reconnues internationalement pour des voies de polymérisation désormais bien établies comme les polymérisations radicalaires contrôlées permettant un contrôle précis des architectures et fonctionnalités. Cette communauté se voit particulièrement sollicitée sur la base des nouvelles exigences environnementales et de développement durable lui permettant de revisiter les différents outils de polymérisation, y compris considérés encore récemment comme conventionnels, avec de nouveaux monomères et synthons issus de la biomasse. Ces nouvelles démarches ne devront

pas se limiter à de simples transpositions de la chimie des polymères pétro-sourcés mais l'occasion de développer des approches novatrices. Il s'agira, par exemple, de repenser la démarche de conception en intégrant une analyse du cycle vie, de prendre en compte la distribution d'architectures moléculaires et de fonctionnalités inhérente à des composés issus de la biomasse ou de prendre en compte les différents paramètres de procédé y compris des volets de catalyse. De telles orientations nécessiteront de se rapprocher d'autres communautés de chimistes comme ceux de la chimie moléculaire, organo-métallique ou de catalyse, de biochimistes mais aussi du génie des procédés.

La même nécessité de rapprochement apparaît pour le design d'architectures macromoléculaires ou hybrides organiques-inorganiques mais aussi de nanoparticules destinées à la conception de nanostructures et systèmes fonctionnels où la précision dans la topologie et fonctionnalité est essentielle. Ici encore, la maîtrise et le développement de nouveaux procédés permettront des approches novatrices qui contribueront au renouveau des thématiques en chimie macromoléculaire.

La mise en place de réelles interfaces avec les autres sections (11, 12, 13, 15...) devra être soutenue par le CNRS et renforcée dans les appels à projets d'agences de moyens qui confortent souvent dans ce domaine des travaux disciplinaires.

## 2.3 MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES ET SUPRAMOLÉCULAIRES – SYSTÈMES FONCTIONNELS

### Introduction

Aujourd'hui, des peintures aux composants de téléphones portables, en passant par les textiles, les cosmétiques, les DVD ou les élastomères, les polymères sont omniprésents dans notre vie quotidienne et c'est essentielle-

ment leur légèreté, leur faible coût, leur relative inertie chimique et l'adaptabilité de leurs propriétés thermomécaniques, qui ont fait leur succès. En termes de matériaux d'usage, ils sont conçus et largement utilisés pour recouvrir, envelopper, vêtir, coller, écrire, amortir et résister à de grandes déformations. Pour les décennies à venir, on conçoit maintenant des matériaux macromoléculaires et supramoléculaires aux fonctionnalités plus complexes pour les biotechnologies, la médecine ou les technologies de l'information et de la communication.

Il s'agit, en premier lieu, de propriétés de transduction (opto-électronique, électro-chimique, piézo-électrique ou électro-luminescence) utilisées dans des dispositifs comme les capteurs ou les afficheurs et plus généralement dans des fonctions de saisie de l'information ou de sa communication. Dans ces directions de recherche, la demande industrielle d'architectures moléculaires à propriétés innovantes est forte. Au-delà des polymères elle concerne divers types d'assemblages moléculaires pour lesquels les potentiels de la chimie supramoléculaire et macromoléculaire sont importants. Les objectifs de stabilité et de durée de vie des composants sont relativement bien définis. Par contre, les propriétés thermodynamiques ou structurales et les processus d'assemblage de ces matériaux complexes sont encore relativement inexplorés. Cette relative méconnaissance motive ainsi des investissements en recherche fondamentale.

L'utilisation des polymères dans les biotechnologies et tout d'abord dans des applications médicales du domaine des prothèses, de la vectorisation de principes actifs ou des organes artificiels requiert, en plus de propriétés mono- ou multi-fonctionnelles, des caractéristiques spécifiques de biocompatibilité, de non-toxicité et/ou de biodégradation. Dans le domaine du diagnostic médical et de la traçabilité agro-alimentaire, les puces à ADN et bientôt les puces à sucres, à protéines ou à cellules souches nécessitent de concevoir et de réaliser de nouvelles architectures moléculaires à base de polymères de synthèse ou de biopolymères. Ajoutons que, dans ce contexte scientifique, la compréhension des processus

physico-chimiques naturels permettra aussi de développer des approches biomimétiques susceptibles d'enrichir les méthodes de synthèse, d'assemblage moléculaire ou d'élaboration de matériaux.

Les dernières décennies nous ont aussi fait prendre une conscience plus aiguë de la nécessité de préserver les ressources naturelles de la planète en développant des technologies « propres » et de nouvelles sources d'énergie. Dans le domaine des polymères et des matériaux moléculaires cela implique, à notre niveau, un effort de recherche fondamentale sur la prise en considération dans le processus de conception matériaux aux synthèses aux processus de dégradation conditionnant la durée de vie des matériaux, plus respectueux de l'environnement (analyse du cycle de vie). Dans le champ des nouvelles sources d'énergie, de nombreux verrous scientifiques et techniques doivent aussi être levés si l'on veut, qu'un jour la conversion photovoltaïque à base de polymères puisse s'imposer comme solution crédible.

## Objets d'étude

Une première catégorie de matériaux dits mésomorphes, ou *cristaux liquides*, font toujours l'objet de recherches actives du fait de la diversité des structures qu'ils sont susceptibles de présenter et qui peuvent être contrôlées par des méthodes chimiques, physiques ou biologiques. Dans le domaine de l'électronique organique, on cherche par exemple à utiliser les propriétés mésogènes de certains groupements moléculaires pour nanostructurer ou orienter les phases lamellaires ou colonnaires de façon à augmenter la mobilité des porteurs de charge dans des architectures  $\pi$ -conjuguées. Il faut remarquer l'utilisation de nouveaux objets mésogènes d'origine synthétique comme des dendrimères et des foldamères, ou biologique comme des oligonuléotides, des microtubules ou des virus en forme de bâtonnets ou de disques. Soulignons que l'importance ultime des défauts de structure dans les dispositifs à base de cristaux liquides mérite que soit correctement transmis l'important

héritage des équipes françaises en études structurales et en modélisation (un GDR pourrait y être consacré).

De nouvelles propriétés ou fonctionnalités peuvent être obtenues en associant une phase inorganique au matériau macromoléculaire ou supramoléculaire. C'est l'orientation choisie pour de nombreuses études sur le photovoltaïque organique où des polymères conjugués donneurs d'électrons sont associés à des fullerènes, des nanotubes ou d'autres nanoparticules acceptrices d'électrons. On retrouve ces matériaux hybrides dans des études concernant la minéralisation à partir d'un support organique ou encore dans la fonctionnalisation de nanoparticules métalliques voire magnétiques destinées à être insérées dans une matrice organique. Les forces de la communauté française sont à la fois dans l'ingénierie, la chimie de fonctionnalisation et les études structurales de la matière molle par rayons X, neutrons et cryo-TEM, mais il reste d'importants efforts à fournir dans les domaines de la durabilité, de la dégradation et plus généralement du cycle de vie, voire de la toxicité de ces (nano)matériaux.

Les matériaux polymères hétérophasés de type mélanges ou nanocomposites restent un champ très actif de recherches appliquées visant les propriétés de renfort mécanique, de résistance au choc, de conductivité électronique ou ionique, de barrière à la diffusion de gaz ou d'eau ou encore de reconnaissance moléculaire. Les principaux efforts de recherche concernent à la fois le contrôle de la dispersion des phases et les propriétés d'adhésion et/ou de dissipation d'énergie aux interfaces du polymère et des nanoparticules, qu'il s'agisse d'argiles, de silice, de fibres ou de nanotubes de carbone. Les compétences en chimie des surfaces, études structurales, mécanique des milieux continus, phénomènes de vieillissement et modélisation multi-échelles existent bien dans la communauté mais souffrent d'un certain cloisonnement disciplinaire qui nuit à leurs possibilités de synergie pour qu'au-delà de l'analyse des défaillances, on puisse parvenir à une conception assistée des matériaux à partir des propriétés visées.

Les multi-couches obtenues en empilant, couche par couche, des polyélectrolytes de charges opposées sur une surface plane ou sur une nanoparticule présentent à la fois une grande simplicité d'élaboration et une variabilité d'utilisation. Leur structure peut être par exemple modulée en alternant des multicouches perméables et des multicouches barrières; ce qui permet de réaliser des compartiments capables de séquestrer des principes actifs, des enzymes ou encore des nutriments puis de les libérer, sous l'effet d'un stimulus, physique, chimique ou biologique. Les applications à l'étude dans le domaine des sciences de la vie et de la santé vont de la bio-compatibilisation de prothèses à la vectorisation d'anticancéreux, en passant par des substrats de culture cellulaire et de nouvelles méthodes d'ingénierie tissulaire.

Les études sur les matériaux polymères à perméabilité contrôlée ont permis des avancées significatives dans le domaine des membranes pour des applications variées en séparation (osmose inverse, microfiltration, nanofiltration, perméation gazeuse et per vaporation, etc.). Dans ce domaine, on note que les enjeux mondiaux liés à l'eau conduisent à un fort regain d'intérêt pour les matériaux membranaires utilisés dans les différents procédés de purification de l'eau. La communauté apparaît également bien structurée autour d'un GDR pour le développement de matériaux polymères conducteurs ioniques pour les batteries et les piles à combustibles. Les approches souvent complexes développées dans la période ont conduit à une variété de nouveaux matériaux membranaires, avec parfois la réalisation de véritables avancées à l'échelle internationale (dynamères, copolymères à hautes performances, réseaux nanostructurés etc.). Les progrès réalisés ces dernières années en termes de matériaux devraient permettre à terme de mieux comprendre l'influence de la nanostructuration sur les propriétés de perméabilité, sujet qui reste encore très peu exploré à l'échelle internationale. Enfin, ces dernières années, les études sur les matériaux polymères à perméabilité contrôlée ont largement dépassé leur cadre initial en s'attaquant au problème diffi-

cile des matériaux polymères barrières pour l'emballage, le conditionnement ou les réservoirs pour nouveaux carburants. La très faible perméabilité attendue pour ces matériaux a conduit la communauté à relever de véritables défis sur les plans de la métrologie et de la modélisation, souvent en collaboration avec des partenaires industriels.

## Concepts et méthodes associées

Les concepts développés pour le design de nouveaux matériaux et systèmes s'appuient sur la prise en compte des fonction(s) visée(s) par l'assemblage de briques élémentaires porteuses des fonctionnalités, le plus souvent à l'échelle nanométrique. Ils associent alors des travaux de synthèse moléculaire, supramoléculaire et macromoléculaire voire à l'interface avec la chimie du solide et la biochimie et des études relatives aux *procédés* d'assemblage de ces briques élémentaires (souvent dénommés NanoBuilding Blocks). On peut citer l'exemple de l'auto-organisation de copolymères diblocs et triblocs permettant de générer des structures lamellaires, tubulaires, hexagonales ou cubiques. De plus, des structures fonctionnelles peuvent être définies par des cinétiques et des procédés hors d'équilibre permettant de piéger des états métastables.

La conception de matériaux fonctionnels moléculaires, supramoléculaires ou macromoléculaires pouvant être intégrés dans des systèmes fonctionnels requiert une mise en commun de concepts et d'outils complémentaires relatifs à plusieurs disciplines issus de la chimie, de la physico-chimie, des procédés et de la physique. Cette combinaison fait toute la richesse et l'originalité des méthodologies proposées dans le cœur de la Section 11.

## Conclusions et recommandations

L'analyse des travaux menés à l'échelle nationale et internationale, dans le domaine des matériaux (multi)fonctionnels conduit aux recommandations suivantes afin de répon-

dre aux défis scientifiques très importants du futur. Ces défis devront être relevés dans un contexte extrêmement compétitif lié aux enjeux applicatifs qui leurs sont associés et aux des requis essentiels liés au respect de l'environnement et à des secteurs stratégiques comme ceux de l'énergie.

- Des travaux devront être impérativement orientés vers le développement d'études théoriques et de simulations numériques pour établir les règles et valider les méthodes de conception de matériaux fonctionnels dans le but de mieux comprendre notamment les phénomènes de transfert multicomposant et de transport électronique, ionique et énergétique dans les polymères. De telles approches permettront de formuler des critères d'élaboration efficaces de structures complexes. En outre, ces approches théoriques et de simulation devront permettre de dégager clairement les phénomènes physiques spécifiques associés aux nanostructures et le lien entre les différentes échelles de dimension.

- Une approche collaborative et synergique entre théoriciens et expérimentateurs devra être soutenue pour la conception et l'élaboration de systèmes (multi)fonctionnels afin de définir les paramètres pertinents cinétiques et dimensionnels permettant d'atteindre les fonctionnalités visées et l'intégration des matériaux dans des systèmes.

- L'intégration d'approches de génie des procédés, voire de conception de nouveaux procédés innovants d'élaboration et de mise en forme à toutes échelles (depuis l'échelle nanométrique) devra être facilitée par de meilleures interactions entre communautés pour permettre le design de matériaux à fonctionnalité(s) nouvelles. Notamment, les processus de nanostructuration, c'est-à-dire de maîtrise de l'organisation de la matière dans les procédés, devront être intégrés pour que de réelles avancées puissent voir le jour en termes d'applications.

- La communauté devra s'interroger également sur des sous-disciplines très bien reconnues au niveau international dans le passé comme la mécanique des polymères portée

par les parallèles avec la physique des matériaux métalliques notamment, ou la rhéologie en lien avec la dynamique moléculaire. Celles-ci n'attirent-elles plus autant de chercheurs et travaux parce qu'elles n'ont pas renouvelé leurs objets d'études ou parce qu'elles se reconnaissent plus difficilement dans les appels à projets actuels? Cette question est importante puisque ces sous-disciplines constituent les fondements des connaissances souvent nécessaires aux travaux de recherche pluridisciplinaires que développent les chercheurs de la Section 11 et que le problème de la pérennisation de ces expertises est crucial.

qu'elle est plus ou moins traitée dans l'ensemble des laboratoires, qu'ils soient de chimie, de physico-chimie, d'ingénierie ou de physique, ainsi que ceux positionnés à une interface avec la biologie.

### Sous-thématiques

Sans être exhaustif sur l'ensemble des travaux menés par la communauté, on peut tenter d'établir une liste de sous-thématiques résumant son activité.

### Surfaces, revêtements et films fonctionnels

Pour de nombreuses applications, les propriétés très variées et spécifiques des surfaces et interfaces leur confèrent un rôle primordial. Maîtriser et optimiser ces différentes propriétés est une activité toujours très dynamique de la recherche. Les voies de synthèse, de formulation ou d'élaboration sont très diversifiées et de nouveaux procédés sont couramment développés à la fois pour varier la nature des matériaux, leur chimie et leur structure, mais également pour rendre plus « intelligentes » les interfaces, soit en les rendant actives, soit en multipliant leur fonctionnalité. Rendre des surfaces ou des interfaces adaptatives, activables ou stimulables à un champ extérieur, à la lumière, à un environnement, pH, solvant, ou température, demande des efforts de synthèse auxquels la communauté des polyméristes français travaille avec succès. L'élaboration de surfaces multifonctionnelles requiert des stratégies d'élaboration et/ou de formulation avec plusieurs constituants dont il faut maîtriser les associations. Les polymères, les nanoparticules ou les colloïdes sont des briques de construction assez versatiles pour réaliser des organisations très intéressantes.

### Matériaux de surface

De nombreux chimistes de notre communauté sont impliqués dans la synthèse de maté-

## 3 – APPROCHES TRANSVERSES DE RECHERCHE DÉVELOPPÉES PAR LA SECTION 11

### 3.1 SURFACES & INTERFACES

#### Introduction

La thématique *Surfaces et Interfaces* est traditionnellement étudiée par la communauté de la Section 11. Celle-ci s'intéresse aux aspects qui relèvent pour l'essentiel des sciences de la matière molle et des matériaux polymères. Bien que les recherches soient principalement de nature fondamentale, elles sont cependant fortement influencées par de nombreuses applications. Sans être exhaustif, celles-ci couvrent des domaines aussi variés que les biotechnologies, l'agro-alimentaire, l'environnement, l'énergie, les produits courants de commodité et d'usage comme les cosmétiques, les vitrages, les adhésifs, les peintures ou encore les pneumatiques. Les partenariats avec les industriels sont donc très courants. En complément, les grands groupes ont également en interne des activités de recherche et développement. En Section 11, la thématique *Surfaces et Interfaces* est très répandue et réellement multidisciplinaire, puis-

riaux à grand rapport surface/volume que sont les nanoparticules ou les poreux. Les fonctionnalités recherchées sont la réactivité ou la sélectivité chimique ou encore des propriétés photoniques remarquables. Les systèmes auto-assemblés de la matière molle, micelles, vésicules, mésophases et autres, offrent une très grande variété de structures qui servent de réacteurs ou de moules pour synthétiser à façon des matériaux de géométrie, de complexité et de chimie toujours plus élaborés.

### *Films et revêtements.*

De nombreux systèmes de la matière molle, tensioactifs, copolymères ont la propriété de s'auto-assembler en solution mais aussi sur une surface ou à une interface. De plus, en voie solvant, il existe de multiples possibilités d'associer par des interactions très variées des petites molécules, des macromolécules, des nanoparticules et des colloïdes. Ainsi les possibilités d'échafaudage sont extrêmement nombreuses, d'autant plus nombreuses que les briques de construction sont elles-mêmes très variées dans leur chimie, leur architecture et leurs propriétés. Les procédés de construction des films et des revêtements élargissent également le champ des réalisations. Il est possible de faire des films mono ou multi moléculaires ou particulaires, de les réaliser en une étape, ou successivement couche par couche. Les propriétés recherchées couvrent de vastes champs d'application. Parmi ces propriétés on peut citer celles de mouillage, d'adhésion, de lubrification, de sélectivité ou de barrière chimique, de biocompatibilité, de séquestrage, de relargage, de furtivité, d'anti-fooling, de transmission et d'absorption optique, de conduction électrique et thermique. Cette ingénierie supramoléculaire ou colloïdale ne s'applique pas seulement à la fonctionnalisation de surfaces solides, elle s'intéresse également aux interfaces liquide/liquide ou liquide/gaz des émulsions et des mousses pour lesquelles les nouvelles formulations cherchent à obtenir des systèmes avec des structures et des propriétés rhéologiques originales.

### *Surfaces structurées.*

Depuis quelques années des efforts importants sont faits afin d'élaborer des surfaces nano ou micro structurées, présentant une topologie chimique ou physique bien contrôlée. La mise en œuvre des différents procédés utilisés est plus ou moins délicate selon les tailles d'organisation ciblées. Les plus simples se font par auto-assemblage de copolymère en film. D'autres, élaborés en plusieurs étapes, tiennent de la lithographie ou bien de l'impression par tamponnage ou jet. D'autres encore exploitent des instabilités générées sous champ électrique ou par des contraintes mécaniques. Les applications visées de surfaces ainsi structurées sont par exemple les puces ADN, les biocapteurs ou encore les dispositifs photoniques. Il existe également de nombreuses motivations fondamentales à développer ces surfaces nano ou micro structurées. Elles sont des surfaces modèles de rugosité ou d'hétérogénéité bien définies, physique ou chimique, qui permettent de comprendre et de caractériser des effets de taille sur différents phénomènes et comportements, tels que l'adhésion ou la friction, le mouillage, les interactions moléculaires entre surfaces ou celles avec des cellules vivantes.

### **Mouillage**

Ces dernières années, le développement des surfaces en PDMS à micro-plots obtenus par lithographie est à la base des avancées importantes sur la compréhension de la superhydrophobicité. Les chercheurs français ont largement contribué à ces travaux. Ces surfaces texturées ont permis de caractériser les comportements statiques de ce phénomène. L'intérêt actuel est plutôt concentré sur des aspects dynamiques. En réalité les questions qui sont traitées recouvrent d'une façon plus générale le mouillage sur des surfaces texturées, ordonnées ou désordonnées, en fonction des échelles de taille. Sur ces surfaces, les physiciens de notre communauté s'intéressent particulièrement à l'étalement d'un film liquide, à la dynamique de sa ligne de contact entre les rugosités,

aux écoulements de fluides diphasiques ou complexes, à la condensation et l'imprégnation, au ruissellement d'une goutte ou d'un jet, à l'impact d'une goutte tombant sur la surface, son rebond, son étalement ou sa rétraction. La situation symétrique de l'impact d'un solide tombant sur une surface liquide et le sillage gazeux qu'elle entraîne en fonction du caractère mouillant de la surface solide est également étudiée. Dans ces différentes situations les surfaces superhydrophobes microtexturées sont des systèmes privilégiés comme limite extrême du non-mouillage qui conduit à des comportements plus spectaculaires, plus facilement observables et quantifiables. Ce fut notamment le cas en hydrodynamique avec la quantification du glissement d'un liquide s'écoulant le long d'une surface. Dans le cas de surfaces non-mouillantes, les longueurs de glissement de quelques nanomètres sur des surfaces modèles lisses, deviennent de quelques micromètres le long d'une surface superhydrophobe. Ces résultats qui remettent en question l'hypothèse classique de non-glissement à une surface doivent beaucoup aux physiciens français.

D'autres aspects dynamiques du mouillage/démouillage sont également étudiés notamment sur des substrats liquides ou encore dans le cas où l'évaporation du liquide est non négligeable et induit des phénomènes complexes au voisinage de la ligne de contact.

Il faut également souligner l'intérêt croissant pour le nano-mouillage. L'échelle de validité des lois connues du mouillage et la façon dont elles varient à de telles échelles sont des questions ouvertes. Des techniques de nanomanipulation dédiées à cette problématique permettent déjà d'obtenir de premiers résultats.

### **Mécanique du contact**

Essentiellement deux types d'études sont abordés par notre communauté. Le premier cas s'intéresse aux propriétés lubrifiantes de systèmes relevant de la matière molle en milieu liquide, des systèmes formulés avec des molécules amphiphiles, des macromolécules voire des protéines. Il s'agit généralement d'études

de nanotribologie de films lubrifiants ayant des épaisseurs moléculaires visant à identifier les mécanismes élémentaires de dissipation dans un contact glissant en relation avec la structure du film et de ses composants. Le second type d'études s'intéresse à la mécanique de contact de matériaux polymères, dans différents modes de sollicitation, traction, pelage ou cisaillement. Comme dans les problèmes de contacts adhésifs statiques, le frottement couple les propriétés mécaniques des matériaux, leur rugosité et la physico-chimie des interfaces. La finalité des études est d'essayer de découpler ces contributions afin d'identifier les différents phénomènes fondamentaux selon la nature et les caractéristiques du matériau polymère. Aujourd'hui, la possibilité de façonner des surfaces nano ou micro-structurées explique le fort intérêt porté aux effets de rugosité.

### **Interfaces et films ultra-minces**

Divers types d'études s'intéressent aux possibilités d'auto-organisation de molécules ou de particules confinées bidimensionnellement. Un intérêt particulier est porté aux membranes artificielles à plusieurs constituants, mélanges de lipides ou de lipides et de polymères, ces systèmes étant capables de reproduire par simple association ou ségrégation moléculaires des hétérogénéités des membranes cellulaires (radeaux protéiques, canaux transmembranaires). Les physiciens s'intéressent également à la structuration de particules colloïdales piégées à une interface ou par un film ultra-mince suspendu. Les interactions capillaires entre les particules peuvent être modulées et surtout orientées selon l'anisométrie des particules et la nature du milieu suspendant (comme des cristaux liquides).

Le confinement de polymères en film ultra-mince, à des tailles nanométriques bien inférieures à une taille macromoléculaire, intéresse fortement les physiciens. Ils s'intéressent à l'évolution des propriétés dynamiques et rhéologiques du polymère induite par l'ultra-confinement. De même, il a été constaté des

déviations significatives de la température de transition vitreuse dans des conditions extrêmes de confinement qui seraient liées à des hétérogénéités dynamiques spatiales. Ces travaux trouvent actuellement un prolongement en l'étude mécanique de composites dont les charges de renfort confinent localement la matrice polymère à leur interface.

La dynamique des fluctuations capillaires d'une interface suscite toujours de l'intérêt mais dans des situations assez particulières. Notamment les physiciens s'attachent à caractériser cette dynamique dans le cas de tensions superficielles extrêmement faibles, rencontrées par exemple dans des suspensions colloïdales démixées. Les fluctuations des interfaces sont alors micrométriques. Les interfaces de systèmes hors-équilibre en cours de vieillissement, comme dans un gel colloïdal, ont également des dynamiques assez particulières avec des événements intermittents liés à des réarrangements en cours dans leur voisinage. Comprendre et caractériser ces dynamiques intermittentes est un sujet d'actualité.

## Conclusions & recommandations

Comme on l'a vu au travers de la présentation précédente, la communauté scientifique nationale présente indéniablement des forces puisque

*i/* il s'agit d'une communauté multi-disciplinaire développant des collaborations entre chimistes, physico-chimistes et physiciens et forte de compétences solides en chimie de synthèse, notamment en chimie macromoléculaire ;

*ii/* une culture nationale forte en science de la matière molle existe depuis de nombreuses années et a été préservée (école de Gennes) avec une très bonne reconnaissance internationale ;

*iii/* la communauté développe un partenariat étroit avec les industriels entre autres français

Néanmoins, des faiblesses liées à la grande dispersion sur le territoire des cher-

cheurs et des équipes sont à relever. L'avenir peut devenir incertain car la communauté des physiciens s'effrite. Aussi, son renouvellement et sa cohésion devront être assurés.

## 3.2 THÉORIE & SIMULATION

### Introduction

Les propriétés des matériaux mous font intervenir pour la plupart toute une gamme d'échelles pertinentes : l'échelle moléculaire, l'échelle d'une organisation mésoscopique et l'échelle de l'échantillon macroscopique. Les études théoriques et numériques balayent toute cette gamme, de façon complémentaire, avec des techniques très différentes. La complexité des systèmes étudiés nécessite des simplifications importantes des équations de base permettant de les décrire. Ainsi, l'identification des paramètres physiques pertinents est un des rôles majeurs du théoricien de la matière molle, qui ne peut, la plupart du temps, partir d'équations « exactes ». L'interaction avec l'expérience est donc cruciale pour permettre la validation des approximations faites, et le travail théorique et expérimental est souvent fait par les mêmes personnes, ou au sein du même groupe.

L'apport du numérique dans le domaine est de plus en plus présent. L'augmentation des capacités de calculs et des codes libres ou commerciaux à disposition des chercheurs autorise des simulations de plus en plus réalistes (simulations 3D, élargissement des échelles spatiales accessibles pour un niveau de détail donné). Les résultats obtenus viennent en appui des approches analytiques simplifiées et des expériences.

### Approches « moléculaires » : l'étude des systèmes discrets

Les systèmes les plus petits de la matière molle commencent à être abordés avec une description à l'échelle moléculaire ou ato-

mique (ARN, ADN, canaux ioniques, moteurs des flagelles, interaction liquide/paroi, etc.). Les simulations numériques jouent un rôle essentiel dans ce domaine. Les techniques de dynamiques moléculaires utilisées à cette échelle, bien adaptées à la parallélisation, sont également utilisées pour reproduire le comportement des systèmes discrets macroscopiques (granulaires...).

### Structures mésoscopiques

L'étude des systèmes à l'échelle mésoscopique est au cœur de la matière molle, avec l'élaboration de modèles mécaniques et statistiques dans lesquels un bruit (thermique ou non thermique) et des interactions (souvent hydrodynamiques) agissent sur des structures déformables. Une activité importante porte sur les polymères, les membranes, les gels (poro-élasticité), les agrégats de cellules, les fibres biologiques (filaments d'actine, microtubules...). L'étude des fluctuations hors équilibre et des bruits non thermiques est un champ d'activité théorique important (théorème fluctuation dissipation hors équilibre, physique statistique des systèmes vitreux, précurseurs de fractures ou d'avalanches).

### Milieux continus

De nombreux systèmes peuvent finalement être décrits comme des milieux continus (fluides complexes, tissus...). Une question phare du domaine est la prédiction des équations constitutives de ces systèmes à partir des propriétés de la structure mésoscopique sous jacente. Des développements marquants sont effectués actuellement dans l'établissement de modèles continus stochastiques ou déterministes rendant compte d'effets non locaux, de vieillissement, de processus actifs, d'intermittence et de localisation de la plasticité et d'aspects spécifiquement tensoriels.

Les échelles spatiales de la matière molle, souvent de l'ordre du micron, génèrent des questions nouvelles dans le champ classique

de l'hydrodynamique : interfaces libres à petit nombre de Reynolds, comportements collectifs induits par les interactions hydrodynamiques, rhéologie interfaciale.

Ces questions peuvent être abordées avec de très nombreuses méthodes numériques, qui tendent à se développer et à se démocratiser (éléments finis, fonction de Green, champ de phase, smooth particle hydrodynamics, Monte Carlo). On note l'apparition de simulations « multiéchelles », prenant en compte différents niveaux de description en différents points du système, mais il existe encore peu de gros calculs, massivement parallèles, dans le domaine.

## 3.3 INTERFACE AVEC LA BIOLOGIE

### Introduction

Cette partie thématique qui relève de la Section 11 s'est considérablement développée dans les 5 dernières années. L'interface avec la Biologie constitue maintenant un des principaux thèmes de la Section 11, avec chaque année des postes qui y sont attribués, allant de l'optique pour la biologie jusqu'à des aspects de reconstitution des systèmes biologiques, ou des études physiques *in vivo* s'appuyant sur des concepts développés en matière molle.

### Thématiques développées

Les thématiques développées dans le contexte de la Section 11 sont diverses et très ouvertes, et nous donnerons ci-dessous une liste non exhaustive

#### **Optique pour la biologie et autres techniques d'imagerie**

Les nouvelles techniques de l'optique permettent surtout une imagerie plus précise (20 à 80 nm de résolution, moins de signal/bruit)

d'un plus petit nombre de molécules, ou une imagerie de plus en plus performante pour l'étude des systèmes dans des conditions *in vivo*, avec ou sans marquage fluorescent. Certaines techniques optiques comme la corrélation de fluorescence (FCS) permettent de suivre en temps réel la mobilité de molécules, *in vitro* et *in vivo*, avec une résolution spatiale de l'ordre du pixel de l'image (qui peut atteindre quelques nanomètres avec une caméra sensible et un objectif X100) alors que les techniques maintenant classiques (microscopie confocale, spinning disk) ne peuvent aller au-dessous d'une fraction de micron, la résolution optique. La microscopie de force atomique (AFM) permet maintenant de visualiser des molécules uniques et leurs changements de configuration à une échelle spatiale de l'ordre d'une dizaine de microns, et une échelle temporelle bien inférieure à la seconde. Un couplage entre les différentes microscopies devrait permettre dans les années à venir de bien compléter les techniques de caractérisation du vivant. Notons également une large part de la microscopie électronique, et plus récemment la cryomicroscopie qui permet une visualisation du vivant dans des conditions de congélation *in situ* et évitant les artefacts dus au traitement des échantillons par des fixateurs. Par contre, la microscopie électronique ne permet pas d'aborder la dynamique des systèmes.

L'imagerie *in vivo* de l'animal est également un développement important dans les dernières années. La microscopie multiphotonique permet une visualisation plus profonde des tissus (jusqu'à 700 microns en 2 photons.heure) par un éclairage plus localisé. Plusieurs projets tirent partie de cette propriété, et sont ainsi capables de faire de l'imagerie sur animal vivant, recevant une stimulation extérieure. Ainsi l'imagerie du cerveau ou des neurones peut être conduite dans des conditions réelles.

L'imagerie biologique a connu au cours de la décennie passée des développements majeurs en lien avec une conception de plus en plus intégrative et fonctionnelle de la biologie. L'étude des dynamiques et interactions moléculaires passe par leurs suivis cinétiques

au cours de processus physiologiques naturels ou induits. Les lasers et l'optique non-linéaire, l'apparition des sondes fluorescentes de type protéines fluorescentes *in vivo* (la GFP, green fluorescent protein), ont permis des progrès spectaculaires pour l'imagerie en molécule unique, mais aussi en cohorte de cellules. L'enjeu actuel est de réussir à corrélérer l'information obtenue par les différentes microscopies de fluorescence (FRET: transfert d'énergie entre molécules fluorescentes, FCS: spectroscopie de corrélation de fluorescence, anisotropie, FRAP: redistribution de fluorescence après photoblanchiment, TIRF: total internal reflection fluorescence microscopy) en développant des dispositifs multimodaux. L'ambition sera ensuite de réaliser ces études au sein d'organismes vivants. Ces techniques doivent être également couplées à l'AFM et la microscopie électronique.

L'utilisation de protéines photoactivables (soit fluorescentes, soit dont l'activité biologique est activée) couplée aux dispositifs très sensibles d'imagerie (PALM: photo-activated localization microscopy, STORM: stochastic optical reconstruction microscopy, STED: stimulated emission depletion microscopy) permettra d'atteindre des résolutions spatiales de l'ordre de 5 à 20 nm et temporelle de l'ordre de 30 ms. Les années à venir devraient voir l'émergence de techniques basées sur le contraste intrinsèque d'objets biologiques non fluorescents, comme l'holographie, l'OCT: optical coherence tomography, la microscopie plasmonique. Ces approches entre physique et matière molle «vivante» rentrent pleinement dans les spécificités de la Section 11.

### **Systèmes reconstitués inspirés de la biologie cellulaire**

Les physiciens se sont attachés à concevoir des systèmes expérimentaux épurés afin d'étudier les mécanismes physiques des grandes fonctions biologiques comme la division et le mouvement cellulaires. En effet, la cellule est un objet complexe qui, même si sa mécanique peut être caractérisée (c'est un

objet viscoélastique, comme une solution concentrée de polymère), reste difficile à décomposer en modules engagés dans tel ou tel comportement. Grâce aux progrès spectaculaires ces dix dernières années en biologie moléculaire et biochimie, il est maintenant possible d'isoler les différentes molécules responsables de la dynamique cellulaire, et de les purifier. Des systèmes biomimétiques sont donc maintenant construits qui miment la dynamique du cytosquelette, celle de la membrane plasmique, à partir de protéines purifiées et de lipides synthétiques ou purifiés. La dynamique cellulaire peut ainsi être étudiée dans des conditions parfaitement contrôlées dans lesquelles la concentration en protéines et leur activité sont connues. Les forces et les pressions exercées par de tels systèmes peuvent être ainsi mesurées et comparées à des situations *in vivo*. Ces systèmes expérimentaux permettent une modélisation théorique analytique ou en simulation et le développement de concepts théoriques généraux qui s'appliquent également à la cellule vivante.

Une autre approche des systèmes biomimétique est de concevoir des systèmes purement artificiels, non pas à base de protéines, mais à base de macromolécules et éventuellement de lipides synthétiques. Cette fois-ci, cette approche peut aider à comprendre des systèmes cellulaires simples comme des globules rouges, et comment ils se comportent dans un flux ou encore leurs propriétés d'adhésion sur des parois.

## Membranes

L'étude physique des membranes artificielles et biologiques constitue une grande part des thèmes de recherche de la section 11, des propriétés purement mécaniques de membranes jusqu'aux propriétés réactionnelles en tant qu'objets à deux dimensions sièges de la plupart des réactions cellulaires. L'hétérogénéité des membranes cellulaires en fait un sujet riche et porteur de questions fondamentales sur le rôle de l'organisation membranaire dans les fonctions cellulaires dynamiques.

## Application des membranes à la pharmacologie

Les systèmes membranaires, et plus généralement les systèmes basés sur l'auto-assemblage de polymères à deux dimensions constituent des outils de choix pour l'encapsulation de matériel pour des visées thérapeutiques. De tels sujets mettent en jeu des compétences qui sortent de la section (tests thérapeutiques, toxicologie, stabilité dans des conditions réelles) mais s'appuient sur des notions de physicochimie (stabilité des membranes sous conditions différentes de pH, solidité mécanique, perméabilité, fusion membranaire, etc.).

## Spectroscopie de force

Les techniques de mesure de force sur molécule unique (spectroscopie de force) se sont considérablement développées ces dernières années avec des appareils basés sur des pinces optique ou magnétique capables d'exercer des forces du piconewton à quelques nanonewtons. Alors qu'il y a dix ans l'ADN était traité dans la communauté de la matière molle comme un polymère modèle qu'on pouvait micromanipuler, ce qu'on ne pouvait pas faire avec un polymère synthétique, la spectroscopie de force a permis récemment des avancées spectaculaires dans la compréhension des mécanismes d'interaction des acteurs agissant sur l'ADN, pour sa transcription, et aussi sa topologie. Depuis quelques années maintenant ces techniques sont adaptées aux protéines et permettent de comprendre comment leurs changements de conformations sont possibles sous l'effet de l'application d'une force. L'application de la spectroscopie de force sur des protéines est la mécanosensibilité, i.e. comment des molécules transmettent au reste de la cellule les informations mécaniques. Souvent, il s'agit de sites cryptiques qui sont « révélés » sous l'action d'une force, et qui déclenchent ensuite une signalisation cellulaire.

Les forces d'assemblage moléculaires peuvent aussi être mesurées par des systèmes

microfluidiques dans lesquels une protéine d'intérêt est immobilisée sur une surface, et ses interacteurs injectés dans un flux permettant, par exemple par des marquages fluorescents l'observation de molécules uniques par des techniques optiques comme la réflexion totale de fluorescence (TIRF), et de caractériser la dynamique d'interaction.

### **Mesure de forces et d'interactions sur des systèmes vivants**

La spectroscopie de force sur molécule unique peut aussi être étendue à de petits objets vivants (bactéries, virus, spermatozoïdes, cellules de mammifères) et il est ainsi possible d'estimer de manière directe les forces d'adhésion ou d'interaction entre ces différents objets, et de comprendre leurs mécanismes d'interaction. Un exemple est celui de virus macrophages qui sont capable d'injecter leur ADN dans leur proie (par exemple des bactéries).

Les études des interactions de la cellule avec son environnement, ainsi que les interactions intermoléculaires se sont développées grâce en partie aux outils microfluidiques. Ainsi, le rôle de l'adhésion cellulaire peut être étudié de manière contrôlée, en connaissant la force par le flux appliqué. En microfluidique également, l'interaction molécule-molécule et leur réaction sont étudiées en mettant en contact deux gouttelettes jouant le rôle de bio-réacteurs. On peut ainsi suivre un grand nombre de ces réacteurs, permettant une étude statistique satisfaisante, à l'aide éventuellement de marqueurs de réaction.

### **Tissus et assemblées cellulaires**

Dans des tissus cellulaires ou des assemblées de bactéries, des signaux extracellulaires sont émis et permettent la cohésion de l'ensemble. Là encore, des systèmes expérimentaux épurés permettent l'étude contrôlée de la mécanique de l'ensemble. Des systèmes d'aspiration dans des micropipettes permettent de caractériser la mécanique de ces ensembles.

Des modèles théoriques génériques peuvent être ainsi développés avec un aller-retour constant avec l'expérience.

### **Bio-capteurs**

Une bonne connaissance de la physico-chimie de surface, qui fait partie des thèmes historiques de la matière molle, a permis il y a quelques années de démarrer une activité de biocapteurs, soit au travers d'interaction avec les récepteurs de cellules, soit comme détecteurs d'un petit nombre de molécules dans un extrait de cellules, ou dans une assemblée d'ADN pour une application génétique. De telles techniques s'appuient sur les compétences en détection de petites quantités de molécules sur des surfaces (plasmons de surface par exemple), et nécessitent le développement d'une fine chimie de surface.

### **Conclusions & recommandations**

Aussi, il est possible de dégager les principales forces de la communauté scientifique de ce domaine. Cette communauté interdisciplinaire est forte et structurée en réseau au niveau national (GDR) avec des « points chauds » de développements. En amont, des compétences d'amont fortes en physique, mathématique et matière molle sont présentes et contribuent à la bonne reconnaissance internationale en général. D'excellentes collaborations entre biochimie, chimie et physique dans le cadre d'un système intégré sont à noter puisque de plus en plus de projets présentent une implication de chaque communauté (notamment entre biologie et physico-chimie).

Il faut toutefois relever des faiblesses comme la trop faible accessibilité des appareils d'optique pour l'ensemble des laboratoires qui rendent difficiles des travaux plus originaux et à risques. De plus, il est nécessaire que plus d'intérêt chez les biologistes soit suscité sur les développements d'équipements dans ce domaine. En effet, actuellement, les biologistes attendent trop que les équipements soient

commercialisés pour les utiliser. Dans un autre domaine, il est parfois difficile d'évaluer l'application biologique visée, en particulier pour la mise au point de capsules microniques pour médicaments (domaine de la vectorisation). Enfin, l'implication des biotechnologies en France reste extrêmement faible rendant difficile un véritable transfert des approches fondamentales vers des applications.

## 4 – CONCLUSIONS

Comme on a pu le voir, la Section 11 recouvre des volets disciplinaires très variés et qui, même si des précautions et des évolutions sont nécessaires, ont pour la plupart une réelle reconnaissance internationale. De plus, elle puise son originalité dans une forte interdisciplinarité qui prend tout son sens avec des projets comme ceux liés au développement durable et à la santé. Si la communauté s'est complètement approprié ces motivations sociétales qui supportent les nombreux guichets d'appels à projets auprès desquels les chercheurs de la Section réussissent à trouver des moyens pour leurs recherches, il convient de veiller à ce que les travaux gardent une pertinence dans leurs objets d'étude et ne soient pas uniquement motivés par la réussite à ces appels. On pense par exemple aux nombreuses équipes qui revendiquent de travailler dans le domaine de la vectorisation où une proximité avec des biologistes et des thérapeutes est indispensable ou celui des bioressources pour la synthèse et l'élaboration de nouveaux polymères qui ne peut présenter de pertinence que si une analyse complète de cycle de vie est faite.

Il faut ici rapporter les craintes qui peuvent être celles des chercheurs de la Section 11 et qui sont celles du monde de la recherche scientifique publique devant la nouvelle organisation du paysage et de ses évolutions constantes au cours de ces dernières années. En premier lieu, la communauté de la Section 11 et sa capacité à développer des

approches inter et multidisciplinaires, ne sont possibles qu'au sein d'un organisme national comme le Centre National de la Recherche Scientifique qui a pu et doit avoir en mains les moyens d'une politique scientifique nationale de coordination de la Recherche et de préservation des expertises scientifiques françaises reconnues internationalement. Les outils de structuration et d'évaluation de la recherche peuvent en effet mettre à mal des disciplines scientifiques qui ne peuvent être reconnues dans des appels à projets qui favorisent les sujets à la mode du moment, ne conduisant pas aux performances bibliométriques requises pour répondre aux critères dits d'excellence et/ou comportant trop de risques et d'investissement de temps. Il est en effet à craindre que les chercheurs plus jeunes ne repoussent des domaines scientifiques qui ne garantissent pas de bons indicateurs à échéance courte pour se consacrer à des projets peu novateurs et sans rupture. Enfin, les outils proposés par leur caractère individuel dans les moyens proposés au chercheur, pourraient nuire à une approche collective de la recherche qui est essentielle à l'inter/ pluridisciplinaire revendiquée par la Section 11. La plus-value du collectif et de l'intégration dans la structure laboratoire doit être défendue. Il en va de même pour les structurations des laboratoires, trop souvent construits sur des politiques des établissements en regroupant de manière artificielle scientifiquement les unités abritées, structures qui mettent à mal la visibilité des chercheurs capables de développer une recherche d'une très grande qualité mais en position numérique sous-critique.

On notera également la nécessité pour les chercheurs de la Section 11 de pouvoir disposer de temps d'accès aux grands instruments et plateformes (diffusion de rayonnement, microscopies électroniques et à champ proche, techniques de fluorescence) indispensables à leurs travaux de caractérisation aux échelles spatiales et temporelles caractéristiques des objets qu'ils étudient. L'implication des organismes doit impérativement être préservée dans ces grandes structures afin de disposer des meilleurs outils mais aussi pour contribuer à travers leurs questions scienti-

fiques à leur développement avec l'aide de chercheurs local-contacts.

Enfin, même si ce sujet n'a pas été traité en tant que tel, il est essentiel, pour la préservation et le développement des disciplines scientifiques de base indispensables aux travaux de recherche de la Section 11, de préserver le soutien et de renforcer les moyens humains d'accompagnement de la recherche, les personnels ingénieurs, techniciens et administratifs. En effet, de nombreux travaux développés en Section 11 font appel à des moyens expérimentaux lourds souvent sous forme de plateformes permettant une mutualisation qui ne peuvent fonc-

tionner et être développés qu'environnés de personnels hautement qualifiés. Cette présence concerne non seulement les personnels dits « techniques » mais aussi les personnels administratifs et en particulier de gestion et management de projets. Le nouveau paysage de la recherche fait de guichets très nombreux et d'appels à projets en temps pour les chercheurs déposants a créé de nouveaux métiers, ceux liés à l'ingénierie de projets qui doivent venir alléger les chercheurs des tâches purement administratives. L'organisme CNRS et les établissements abritant les unités doivent veiller à préserver ce potentiel humain qui garantit une qualité de la recherche effectuée.

## ANNEXE 1

ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AFM	Atomic Force Microscopy
ARN	Acide RiboNucléique
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AXELERA	Pôle de Compétitivité Chimie & Environnement
COV	Composé Organique Volatil
CPDD	Programme ANR Chimie & Procédés pour le Développement Durable
FCS	Fluorescence Correlation Scattering
FRAP	Fluorescence Redistribution After Photobleaching
FRET	Fluorescence Resonance Energy Transfer
GFP	Green Fluorescence Protein
IAR	Pôle de Compétitivité Industrial AgroRessources
IPN	Interpenetrated Network

IRM	Imagerie Résonance Magnétique
LBL	Layer-By-Layer
LCD	Liquid Crystal Display
OCT	Optical Coherence Tomography
PALM	Photo-Activated Localization Microscopy
PDMS	Poly(DiMéthyl Siloxane)
POSS	PolyOligomericSilSesquioxane®
PET	Poly(Ethylène Téréphtalate)
PRC	Polymérisation Radicalaire Contrôlée
PU	Polyuréthane
QD	Quantum Dot
RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
SFA	Surface Force Analysis
STED	Stimulated Emission Depletion Microscopy
TIRF	Total Internal Reflection Fluorescence
VDU	Vélocimétrie Doppler Ultrasonore

# 12

---

## ARCHITECTURES MOLÉCULAIRES : SYNTHÈSES, MÉCANISMES ET PROPRIÉTÉS

*Président de la section*

Jacques MADDALUNO

*Membres de la section*

Marie-Chantal ANDRAUD

Janick ARDISSON

Didier BOURISSOU

Stéphane DJAOUI

Elisabet DUNÁCH

Jean-Claude GUILLEMIN

Philippe JAUFFRET

Philippe KAHN

Hakim KAROUI

Stéphanie LEGOUPY

Julien LEGROS

Philippe LESOT

Alain MAGGIANI

Jean MARTINEZ

Véronique MICHELET

Gérard MIGNANI

Damien PRIM

Marc SALLÉ

Jean-Louis SCHMITT

Jieping ZHU

### PRÉAMBULE

La Section 12 rassemble la plupart des chercheurs dont l'activité principale est inscrite dans les domaines de la synthèse, la structure, les propriétés et la réactivité des molécules organiques. En mars 2010, elle était la section principale pour 26 unités (dont 19 UMR et 5 FR), abritant 241 chercheurs du CNRS (145 CR, 96 DR) et environ 450 enseignants chercheurs (chiffres 2009 pour cette catégorie). Un rapport de conjoncture idéal se doit de présenter un état des lieux pour cet ensemble et décrire des pistes vers ce que l'avenir pourrait avoir de meilleur dans ce domaine scientifique. Si la vingtaine de membres de la Section 12 du Comité National peut proposer une vue d'ensemble raisonnable des sous-disciplines qui y sont rassemblées, au moins dans leurs grandes lignes, la seconde partie de cet exercice est plus périlleuse. Il est en effet difficile, même impossible, de déterminer la portée à moyen et long terme de recherches en cours ou sur le point d'être initiées, et donc de proposer des axes thématiques porteurs à soutenir en priorité. La lecture rétrospective des précédents rapports de conjoncture, rédigés pourtant par des collègues dont la compétence ne fait aucun doute, en donnerait très probablement la preuve. Par contre, et avec plus de chances de succès, nous pouvons cher-

cher à identifier les secteurs sous-explorés ou au contraire ceux qui sont le(s) théâtre(s) d'une activité particulièrement intense à l'instant de la rédaction de ce rapport. Ces secteurs, que nous essayons de mettre en avant dans ce qui suit, ne sont pas nécessairement les eldorados de demain, mais ils devront être surveillés du fait de leur activité inventive.

Notre section partage, avec plusieurs autres, le poids d'une image de marque dégradée par un caractère expérimental qui paraît parfois fortement empirique. De ce fait, nos laboratoires sont assimilés par certains à la cuisine du « château de la chimie », dans laquelle chefs et mirlitons s'agitent en tout sens pour élaborer les rôtis et les mille-feuilles dont les chercheurs plus directement perceptibles par la société « civile », feront ensuite leurs délices. Cette réduction caricaturale de la chimie moléculaire à de simples progrès techniques relevant plus du tour de main que des avancées méthodologiques conceptuelles n'a aucun fondement. Les développements proposés dans le rapport qui suit en constituent une démonstration claire. Poursuivant les mutations entamées ces quinze dernières années, la chimie moléculaire a en effet fortement affirmé, depuis le précédent rapport de conjoncture, sa volonté de minimiser la part d'empirisme ou d'encyclopédisme dans ses travaux. Désormais, elle associe de plus en plus systématiquement les techniques, même très élaborées de la chimie analytique et/ou théorique à ses propres méthodes afin de rester, tout au long de l'étude de la réaction, au niveau moléculaire et ainsi éviter, autant que faire se peut, les « boîtes noires » mécanistiques ou structurales. Cette démarche a été rendue possible par la mise à disposition d'un arsenal instrumental d'une sophistication sans précédent, accessible à un coût réaliste, et souvent emprunté aux disciplines voisines. La section 12 est devenue de ce fait un des meilleurs théâtres pour la confrontation entre théorie et expérience.

L'étude des structures et des transformations de la matière à l'échelle moléculaire est une source intarissable de nouvelles connaissances. Elle positionne la section à la base des développements dans de nombreux autres sec-

teurs clés, des matériaux aux outils pour la biologie. Cette priorité aux fondamentaux doit être gardée à l'esprit alors que les moyens de financement tendent à subir les effets d'accordéon liés aux modes (ou urgences) sans cesse plus appuyés et qui sont bien sûr cause de déséquilibre entre disciplines. Il faut souligner qu'une partie significative de nos laboratoires est loin des applications et peut souffrir de difficultés à valoriser ses travaux auprès de partenaires privés mais aussi, désormais, publics. Il est pourtant indispensable de garantir aux chercheurs un espace incompressible de liberté scientifique, lieu de découvertes importantes pour le moyen et le long terme. Les choix stratégiques faits par les établissements et les agences auront de ce fait des conséquences majeures sur l'évolution des disciplines de la chimie en général et de la Section 12 en particulier. C'est par un soutien clairvoyant aux travaux spécifiques à notre secteur que les financeurs aideront à la mise en place de véritables interfaces vers les activités à vocation plus sociétales. Il convient de mettre en avant celles relevant de la chimie propre, concept auquel la Section 12 pourra donner tout son sens via la découverte de méthodologies nouvelles. La chimie moléculaire est en effet étroitement associée à la « civilisation du carbone » dans laquelle elle a propulsé, pour leur plus grand délice, les sociétés développées, mais dont il est devenu impératif de maîtriser la sortie au fil de l'épuisement des ressources fossiles.

Il semble utile, pour conclure, d'évoquer les problèmes liés à la formation et au recrutement des chercheurs, ainsi qu'aux difficultés dans les promotions et les soutiens (individuels ou à travers les unités). Si les promotions semblent faire l'objet d'un effort particulier du CNRS envers ses personnels en 2010-2011, une réflexion générale sur l'ensemble de ces problèmes sera sans doute nécessaire. Cette réflexion devra se pencher en particulier sur les dangers de la « numérisation » des performances des individus et des unités. Sans vouloir être, à notre tour, caricatural, le produit « facteur h nombre de publications » n'est pas suffisant pour faire ressortir les chercheurs de

qualité, même si des évaluateurs pressés risqueraient, dans un souci d'efficacité et de « transparence », de se satisfaire d'une méthode aussi limpide. La section devra également être attentive à protéger le cœur de son métier, en particulier contre elle-même, car les projets applicatifs conjuguent souvent l'attractivité de l'exotisme à la fascination du concret. Mais ce dernier point n'est qu'une énième défense et illustration en faveur des activités fondamentales de recherche, une notion chevillée au corps de notre organisme. Seul l'effort vers de nouveaux concepts pourra garantir l'excellence dans l'application de demain. *Il faut imaginer Sisyphe heureux...*

## 1 – MÉTHODOLOGIE ET CONCEPTS EN SYNTHÈSE

### 1.1 NOUVELLES RÉACTIONS

De nos jours, les chimistes cherchent à mettre au point des réactions non seulement chimio-, régio-, stéréo- et énanti- contrôlées, mais aussi économiques et respectueuses de l'environnement. Le développement de nouvelles transformations hautement sélectives et efficaces, facilement automatisables, utilisant des produits de départ peu coûteux, tout en minimisant la perte d'atomes est un objectif majeur.

La synthèse asymétrique a énormément progressé ces vingt dernières années grâce aux avancées réalisées dans le domaine de la biocatalyse, de la catalyse organométallique et plus récemment de l'organocatalyse. Trouver de nouveaux systèmes catalytiques multitâches, capables de promouvoir la formation de plusieurs liaisons chimiques avec un turnover très élevé représente un enjeu très important pour les futurs développements de ce domaine.

La découverte de nouveaux réactifs et catalyseurs permettant la réalisation de trans-

formations inédites ou rendant une réaction connue plus performante constitue un domaine de recherche très prometteur. La réaction de métathèse d'oléfines constitue un exemple particulièrement remarquable puisque la découverte de nouveaux catalyseurs stables et facilement accessibles a conduit à des avancées spectaculaires en synthèse.

Le développement de nouveaux modes d'activation permettant de fonctionnaliser des liaisons réputées inactives représente également un champ d'investigation considérable.

La production de déchets dans les procédés chimiques est directement liée aux nombres d'étapes synthétiques impliquées dans une synthèse. Ainsi les nouvelles réactions qui permettent la création de plusieurs liaisons de façon « one-pot » est une des directions importantes dans le développement de la chimie éco-compatible. À cet égard, les processus domino et les réactions « multicomposants » sont particulièrement pertinents.

### 1.2 CATALYSES

La plupart des réactions chimiques requièrent, pour avoir lieu, un apport d'énergie, l'énergie d'activation. Certaines substances, comme les catalyseurs sont susceptibles de diminuer cette énergie d'activation et favorisent donc la réaction. Les catalyseurs peuvent, de plus, être récupérés en fin de réaction, ce qui les distingue des autres partenaires réactionnels que sont les substrats et réactifs. Le phénomène de catalyse a été reconnu dès le XIX<sup>e</sup> siècle, mais il est resté longtemps très mal compris. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'étude des réactions catalytiques progressa de façon pragmatique et très empirique surtout dans le domaine de la catalyse hétérogène. La catalyse homogène s'est ensuite rapidement développée, sous ses différentes facettes (organocatalyse, catalyse organométallique et biocatalyse), au point d'être à présent un outil incontournable en synthèse. L'engouement pour la catalyse a pris récem-

ment une nouvelle dimension, ce qui est probablement dû à une prise de conscience concernant la gestion des ressources énergétiques et matières premières et les problèmes d'environnement. Les concepts (12 principes) énoncés par Anastas et Warner en 1998 ont fait de la catalyse l'un des points centraux de la chimie moderne. Elle permet en effet de limiter les quantités de réactifs utilisés, d'économiser l'énergie en augmentant l'efficacité des procédés, et de faciliter les séparations en augmentant les sélectivités.

## Organocatalyse

Si la catalyse métallo-assistée a longtemps dominé le champ de la catalyse homogène, une approche complémentaire a émergé ces dernières années : l'organocatalyse. L'organocatalyse a pour objet l'utilisation de « petites molécules organiques » pour promouvoir des transformations chimiques. Si le concept même d'organocatalyse n'est pas nouveau puisqu'il trouve ses fondements au début du siècle dernier, le terme a été introduit en 2000 et l'activité de recherche correspondante connaît depuis un essor considérable. L'organocatalyse combine les avantages classiques de la catalyse homogène comme l'économie d'énergie d'activation, d'étapes ou d'atomes à celui de l'absence de métal. Elle contribue ainsi fortement au développement d'une chimie plus verte et/ou durable en répondant aux enjeux et problèmes sociétaux actuels (et futurs?). Le mécanisme d'action des organocatalyseurs est d'ailleurs souvent fondamentalement différent de celui des métaux de transition et pourrait se rapprocher davantage de celui des enzymes.

Les « organo-promoteurs » peuvent généralement être trouvés parmi les bases et acides de Lewis ou de Brønsted. Parmi les plus étudiés, se trouvent la proline et ses dérivés, des thiourées, sels de thiazoliums ou dérivés de phosphore, le binol et ses dérivés. Sont également à signaler des molécules naturelles (ou leurs dérivés) comme celles de la famille des quinines. Le contrôle de l'énantiosélectivité est obtenu *via* des interactions covalentes, électrostatiques ou des liaisons hydrogènes.

Depuis ses balbutiements jusqu'aux développements les plus récents, l'organocatalyse a concerné principalement les transformations synthétiques de dérivés carbonyles comme les réactions de Michael, de Mannich, les réactions d'époxydation, de cycloaddition ou plus récemment de transfert d'hydrogène. En dépit des efforts récents et de l'utilisation souvent judicieuse d'étapes organocatalysées pour atteindre des cibles de complexité croissante, le concept souffre toujours de certaines limitations : une faible diversité de transformation chimique et une charge catalytique relativement élevée.

Les avantages liés à l'utilisation d'organopromoteurs, par comparaison avec leurs analogues métalliques, résident à la fois dans leur stabilité vis-à-vis de l'oxydation et de leur faible toxicité mais aussi dans leur prix de revient. Peut-on pour autant, envisager de remplacer les catalyseurs organométalliques? À l'heure de la rédaction de ce texte, la réponse est non car la complémentarité des deux types de catalyse est évidente. La communauté scientifique semble s'orienter actuellement vers des concepts de « seconde génération » qui visent à associer des catalyses organique et métallique ou à combiner plusieurs promoteurs organiques. Des efforts sont entrepris pour abaisser les charges catalytiques et permettre des séquences multiétapes séquentielles ou en version domino. La création de véritables systèmes catalytiques comportant de multiples sites d'activation différents est une approche séduisante susceptible de conduire à de nouvelles réactivités et/ou à un meilleur contrôle de la chimio-, régio- et stéréosélectivité.

La mise au point de nouveaux systèmes catalytiques plus efficaces et plus sélectifs constitue l'un des enjeux majeurs du domaine, dans un contexte international particulièrement concurrentiel.

## Catalyse organométallique

La conjonction des recherches sur les complexes organométalliques au niveau international (travaux de Ziese, Langer, Mond,

Roelen, Reppe, Woodward, et Fischer...) et des besoins de l'industrie chimique (dans tous les domaines de la chimie) ont créé une stimulation à l'origine de nombreuses découvertes en catalyse organométallique et de la mise au point des procédés industriels associés. Plusieurs de ces découvertes majeures ont été récompensées par la communauté scientifique (prix Nobel de Chimie entre 1973 et 2005 : Wilkinson, Fischer, Ziegler, Natta, Noyori, Sharpless, Knowles, Schrock, Grubbs et Chauvin).

Des avancées spectaculaires ont été réalisées en France et dans le monde à la fois pour la formation des liaisons carbone-hydrogène, carbone-carbone et carbone-hétéroatome. Un essor particulièrement important peut être souligné dans le domaine des réactions de couplages catalysées par les métaux de transition, y compris avec des substrats peu ou pas fonctionnalisés et avec des métaux jusque-là peu utilisés dans ce cadre. La recherche de conditions douces, régio-, chimio- et stéréosélectives, tolérantes vis-à-vis des fonctions chimiques et toujours plus respectueuses de l'environnement fait partie des objectifs de plusieurs équipes de la Section 12. Cette quête du « meilleur catalyseur », même si elle est stratégique pour l'industrie, ne se limite pas à des optimisations technologiques (TON, TOF). En effet, une partie de la recherche en catalyse en France est dédiée à la découverte de nouvelles réactivités et de nouvelles réactions tandem permettant d'augmenter la complexité des squelettes formés, tout en limitant la production de déchets. Notre communauté a vu fleurir de nombreuses découvertes dans le domaine des réactions à économie d'atome, des processus tandem, et dans la compréhension des procédés catalytiques, cette dernière impliquant parfois des équipes des Sections 13 et 14 de l'INC.

La catalyse asymétrique, que ce soit pour la formation de liaisons C-H, C-C ou C-X, fait également partie des enjeux majeurs des recherches actuelles. D'une part, il reste encore des verrous technologiques importants à lever dans le contrôle des centres stéréogènes. D'autre part, il est nécessaire et toujours d'actualité de mettre au point des outils cata-

lytiques performants et sélectifs, en jouant sur le métal employé, mais également sur les ligands chiraux associés au métal.

La découverte de nouveaux systèmes catalytiques organométalliques a également pu être associée récemment à d'autres systèmes catalytiques (enzymatique ou organique), et l'utilisation synergique de deux types de catalyse (organométallique/enzymatique et organométallique/organique) a permis de réaliser des transformations jusque-là impossibles. Ces travaux sont encore rares, mais ils connaîtront certainement un essor important dans les prochaines années.

L'ensemble des découvertes en catalyse organométallique a posé des jalons essentiels pour les chimistes de synthèse, dont les cibles nécessitent souvent des outils « chirurgicaux ». Les collaborations de plus en plus nombreuses entre les différentes communautés de chimistes ont été particulièrement profitables pour la découverte de nouveaux systèmes catalytiques et méritent d'être encouragées à l'avenir. Notons enfin que la recherche de conditions permettant l'utilisation de très faibles taux de catalyseurs métalliques est actuellement très active et s'inscrit dans la perspective « développement durable ».

## **Biocatalyse**

L'industrie a su de longue date mettre à profit biocatalyse et biotransformations pour fabriquer des produits chimiques, de la petite échelle (industrie pharmaceutique) jusqu'à plusieurs milliers de tonnes (agro-alimentaire), en faisant appel soit à des enzymes isolées, soit à des cultures cellulaires lorsqu'un cofacteur est nécessaire, ou dans le cas où l'activité enzymatique est supportée par un complexe protéique.

Pour le chimiste organicien, l'intérêt majeur de la biocatalyse réside dans la régio- et la stéréosélectivités des transformations enzymatiques, mais aussi dans une complémentarité avec les outils classiques de la chimie (transformations irréalisables par des voies conventionnelles). D'abord utilisée pour

la production d'intermédiaires chiraux optiquement purs (résolution enzymatique), la biocatalyse apparaît comme l'outil de choix pour la mise en œuvre de stratégies de synthèse *via* l'utilisation d'intermédiaires réactionnels à symétrie latente.

Les progrès réalisés ces dernières décennies tant en génie génétique qu'en chimoinformatique (modélisation moléculaire incluse) ont considérablement diminué le prix de revient et le temps nécessaire à l'optimisation d'une enzyme pour un processus donné (adaptation du pH, de la stabilité thermique, de la spécificité de substrat, recherche des conditions optimales de fonctionnement...). De ce fait, les industriels n'hésitent plus à développer des procédés incluant une ou plusieurs étapes biocatalytiques. Ceci d'autant plus que cette démarche s'inscrit dans le cadre du développement durable et de la chimie verte [longévité des biocatalyseurs, production par des micro-organismes génétiquement modifiés (sur-expression), faibles quantités de déchets, retraitement de ces derniers souvent inutile, économies d'énergie (température de réaction en général < 40 °C), et globalement économies tout court].

Réparties en six groupes (hydrolases, oxydoréductases, ligases, transférases, isomérases, lyases), les enzymes des deux premiers groupes restent jusqu'ici les plus étudiées et les plus utilisées en chimie de synthèse alors que les transformations réalisables par celles des quatre autres groupes sont pourtant loin de manquer d'intérêt. Un effort notable dans cette direction semble nécessaire, d'autant plus que commencent à émerger, dans le domaine des biotransformations utilisant des cultures cellulaires, des biotransformations « deux en un » *via* le génie génétique, premier pas vers des biotransformations multiétapes dans une seule cellule.

Après les solvants organiques, les solvants ioniques commencent à être utilisés en biocatalyse/biotransformation. Une exaltation de l'activité catalytique, de la stabilité thermique, et/ou de la régio- et énantio-sélectivité a été parfois observée dans ces milieux pauvres en eau (réduction des effluents).

Les premiers exemples de Résolution Cinétique Dynamique couplant une réaction chimique équilibrée avec une étape de biotransformation sont parus récemment dans la littérature. Parce qu'elles permettent d'accéder à des composés énantiomériquement purs à partir de racémiques, la recherche et le développement de ces stratégies hybrides doivent être encouragés.

Terminons ce paragraphe avec la mise au point de biocarburants qui a constitué un des enjeux notoires des biotransformations durant la dernière décennie du fait de la quasi-permanence des crises pétrolières ; leur obtention fait l'objet de polémiques multiples. À côté des méthodes chimiques classiques, complexes et polluantes, les lipases peuvent paraître comme une alternative, mais leur coût et leur faible vitesse de réaction constituent, aujourd'hui encore, un des obstacles majeurs à la production de biocarburant par voie enzymatique.

## Catalyse de polymérisation

Les polymères occupent une place particulièrement importante dans notre vie quotidienne. Ils interviennent dans tous les secteurs d'activités et la demande en matériaux polymères présentant des propriétés de plus en plus sophistiquées ne cesse de croître. Afin de satisfaire ce besoin, le contrôle des réactions de polymérisation est une préoccupation majeure des chercheurs. En effet, la préparation de polymères de masses molaires et d'architectures prédéfinies et contrôlées permet de moduler précisément leurs propriétés physico-chimiques. Dans ce contexte, les études effectuées en catalyse organique ou organométallique permettent régulièrement de réaliser des avancées significatives. Elles sont au cœur du développement de méthodologies de polymérisation plus respectueuses de l'environnement.

Au cours de ces dernières années, de nombreux exemples ont illustré de manière remarquable l'apport fondamental de la catalyse pour la polymérisation contrôlée des oléfines et des hétérocycles que ce soit au niveau académique ou industriel. Dans ce contexte,

les principaux enjeux sont la mise au point de nouveaux catalyseurs pour les différentes techniques de polymérisation utilisées (radicalaire, ionique, métathèse...), la compréhension des mécanismes de polymérisation associés à ces catalyseurs ou encore le recyclage et l'élimination de ces systèmes catalytiques. En conséquence, la catalyse de polymérisation permettra sans aucun doute de relever dans le futur de grands défis actuels dans le domaine des polymères. En effet, la mise au point de systèmes catalytiques universels et toujours plus performants est plus que jamais d'actualité pour la préparation de polymères de spécialités. D'autre part, dans le contexte de la disparition programmée des ressources d'origine fossile, le développement de catalyseurs originaux permettant la synthèse de nouveaux matériaux à partir de synthons bio-ressourcés apparaît également comme essentiel.

### 1.3 MILIEUX ET ACTIVATIONS

Des milieux réactionnels alternatifs et de nouvelles méthodes d'activation ont émergé en synthèse organique comme des outils de choix pour le développement de procédés plus efficaces et plus sélectifs. En permettant de limiter les effluents polluants, d'améliorer le transfert d'énergie et de réduire la dangerosité des procédés, ces recherches sont propices au développement d'une chimie éco-compatible et durable. La miniaturisation des procédés est une approche complémentaire qui souscrit à la même démarche d'optimisation réactionnelle et de réduction du risque.

Le développement d'alternatives aux solvants organiques a vu l'émergence de nouveaux milieux comme les fluides supercritiques, les microémulsions, les liquides ioniques, les phases fluorées mais aussi la synthèse en phase aqueuse ou la chimie sans solvant. Si l'eau est désormais considérée comme compatible avec nombre de réactions de synthèse organique, la mise au point de nouvelles techniques de séparation et de recyclage constitue un enjeu majeur. Les réactions sans

solvant représentent également une approche particulièrement intéressante d'un point de vue environnemental et économique, l'enjeu étant ici de gérer au mieux les transferts de matière et de chaleur.

Les méthodes d'activations dites alternatives (ou extrêmes) comprennent les ultrasons, les micro-ondes, la photochimie... Ces techniques sont utilisées de plus en plus fréquemment dans les étapes de synthèse, permettant à la fois d'optimiser les conditions de réaction, et parfois d'augmenter l'efficacité et/ou la sélectivité. Bien que plus spécifiques, l'utilisation des très hautes pressions et les approches dites de mécanochimie doivent aussi être mentionnées ici.

Enfin, les systèmes microfluidiques attirent une attention croissante liée à l'augmentation unique du rapport surface/volume qu'ils permettent d'obtenir. Grâce aux micro-réacteurs, il est possible d'optimiser les processus limités en *batch* par les transferts de chaleur et de masse, de diminuer leur dangerosité et de repousser les limites des réactions mettant en jeu des intermédiaires à courte durée de vie.

Une meilleure connaissance et maîtrise de ces différentes approches et techniques devraient permettre de développer encore leur utilisation et leur portée, à la fois à petite échelle au laboratoire et à grande échelle dans l'industrie.

### 1.4 SYNTHÈSE TOTALE

La synthèse totale correspond à la construction de molécules cibles sophistiquées à partir de produits de départ relativement simples. Elle comprend quatre phases déterminantes : la sélection de la molécule cible (un produit naturel ou une molécule issue du « design »), le choix de la stratégie de synthèse puis celui de la tactique (c'est-à-dire la sélection des réactifs et des conditions opératoires), avec au final la réalisation sur le plan

expérimental. Selon le degré de difficulté rencontré au cours de l'exécution de la synthèse, un réajustement, et même parfois une redéfinition, de la stratégie et de la tactique sont nécessaires.

Les travaux de Woodward et de Corey (prix Nobel de Chimie en 1965 et 1990) ont inspiré des générations de chimistes dans leurs recherches dédiées à la synthèse totale de molécules de plus en plus complexes. On peut également citer ici le pentasaccharide mime de l'héparine et le discodermolide, qui sont des illustrations de l'industrialisation potentielle de molécules des plus complexes dont les propriétés biologiques sont remarquables.

De nos jours, la synthèse totale a un très fort impact sur les disciplines connexes (chimiques, médicinales, de la biologie et des matériaux) *via* la découverte croissante de molécules actives de structure variée et complexe. Cependant, la communauté est toujours à la recherche de procédés à la fois plus efficaces, plus économiques, plus sûrs et plus respectueux de l'environnement. Divers types de stratégie se développent tels que les approches biomimétiques, les réactions en un seul pot, cascades réactionnelles... La synthèse totale a également pu progresser grâce à l'apparition de nouvelles méthodologies. Il est important de remarquer à ce stade, que très souvent, les méthodes ont pu évoluer, voire devenir plus novatrices, grâce aux besoins de la synthèse totale (problèmes de faisabilité, de chimio-, régio-, stéréosélectivité spécifiques à chaque molécule). Les nouvelles méthodologies développées permettent d'ailleurs souvent la préparation d'analogues, ce qui constitue un enjeu important pour améliorer les propriétés biologiques.

Il convient de souligner, pour terminer ce paragraphe, que la pratique de la synthèse totale nécessite la constitution d'équipes de chercheurs de taille suffisante pour pouvoir accéder, en un temps raisonnable, à la molécule cible. Cette exigence est rendue aigue par le contexte international particulièrement compétitif et des besoins thérapeutiques parfois très importants.

## 2 - MOLÉCULES POUR LE VIVANT

De nombreux acteurs de la recherche rattachés à la Section 12 sont impliqués dans des travaux sur des biomolécules aussi variées que les saccharides, les lipides, les acides aminés et leurs dérivés, les molécules naturelles (alcaloïdes, macrocycles, etc.), les acides nucléiques et dérivés, les protéines, les molécules des origines de la vie. Ils démontrent une attention particulière à la valorisation de leurs recherches. Ce secteur d'activités recouvre par essence certaines des thématiques listées dans le reste de ce document (en particulier la synthèse totale et certaines méthodologies organiques dédiées, les matériaux biocompatibles...).

Les thématiques spécifiques qui concernent ces molécules du vivant incluent :

- De nouvelles avancées dans les domaines de la vectorisation des molécules bioactives, en particulier par la conception et la synthèse de nouveaux vecteurs issus de la chimie supramoléculaire et des systèmes auto-organisés (dendrimères, liposomes, etc.).

- La conception et la synthèse de molécules pour le diagnostic et l'imagerie, en particulier de sondes de structure permettant d'étudier les interactions moléculaires et les assemblages complexes. Dans cette thématique, le développement de nouveaux marqueurs fluorescents, permettant l'étude non-invasive de la dynamique de la cellule à l'échelle moléculaire, et l'obtention d'une résolution 3D du milieu intracellulaire, comparable à celle obtenue par la microscopie confocale, est particulièrement important. Il existe un réel besoin de systèmes moléculaires optimisés sur le plan de leurs propriétés optiques, compatibles avec le marquage des biomolécules (faible taille, solubilité dans l'eau, fonctions de greffage, etc.). Plus généralement la synthèse de molécules destinées à l'étude et la compréhension des mécanismes biologiques de reconnaissance moléculaires et d'assemblages moléculaires

complexes est une des préoccupations de la Section 12.

– Le domaine très compétitif des biopuces dans lequel des avancées techniques importantes sont encore nécessaires, en particulier pour améliorer les étapes de greffage, d'immobilisation, de détection, visualisation et quantification, pour augmenter les affinités entre partenaires. Des travaux en cours visent à la mise au point de biopuces à oligosaccharides pour la détection des interactions saccharides-lectines importantes pour étudier les communications inter-cellulaires.

– La « Chimiothèque Nationale » dédiée à la conservation du patrimoine chimique des laboratoires académiques et à la valorisation de ce patrimoine, en favorisant les collaborations à l'interface chimie-biologie. De nombreux laboratoires de la Section 12 sont associés à cette action transverse. L'extension des décryptages génomiques multipliant les cibles potentielles, le criblage à haut ou moyen débit offre des perspectives intéressantes d'utilisation des petites molécules pour comprendre et soigner le vivant. Des résultats significatifs ont déjà été obtenus et la prochaine création d'un TGIR « Chemical Biology » associant la Chimiothèque Nationale à un réseau de plates-formes de criblage et à un réseau de compétences en chémo-informatique permettra d'amplifier cette thématique où la France apparaît comme un leader européen.

### 3 – CHIMIE SUPRAMOLÉCULAIRE

La chimie supramoléculaire et les processus d'auto-association permettent la conception d'architectures parfois complexes, le plus souvent inaccessibles par le seul biais de la chimie covalente. Cette chimie s'appuie sur l'utilisation raisonnée de liaisons faibles, conduisant pour partie aux nanosciences et à la multiplicité en plein essor de leurs applica-

tions potentielles. Ce domaine scientifique vaste et varié, est bien représenté en France.

La chimie supramoléculaire s'appuie sur un continuum de la conception- synthèse de molécules à la mise en œuvre et à la caractérisation des processus supramoléculaires et d'autoassociation. Aussi, ce domaine est typiquement transdisciplinaire et se nourrit des échanges et rapprochements entre chimistes, physicochimistes, physiciens et biologistes. En particulier, le besoin de méthodes d'analyses spécifiques de ces systèmes complexes est permanent et doit être encouragé. Par ailleurs, les cibles visées s'appuient pour nombre d'entre-elles, sur des mécanismes bio-inspirés (transfert d'électron, conversion d'énergie, catalyse supramoléculaire), sur la base d'une approche *bottom-up*. Dès lors, ces mêmes mécanismes sont exploités dans la conception d'objets couvrant un large domaine d'application relevant de la reconnaissance moléculaire, tant à la frontière avec la biologie qu'avec celle des matériaux (composants à propriétés physiques particulières).

Notons que la chimie supramoléculaire s'appuie, pour la synthèse des précurseurs, sur une chimie organique souvent déjà éprouvée, mais employée dans des conditions expérimentales inhabituelles ou avec des exigences de sélectivité et de réactivité extrêmes. On peut à ce titre, mentionner l'exploitation remarquable de la nature réversible des processus d'associations (chimie combinatoire/constitutionnelle dynamique), conduisant à des cibles par ailleurs difficiles d'accès. On peut également mentionner, les travaux visant à contrôler les propriétés collectives d'organisation *via* des processus d'auto-association, comme par exemple les organogels, nanoparticules, micelles, vésicules, nanosphères, cristaux liquides, etc.

Globalement, la chimie supramoléculaire reste donc dans le domaine de la création et la conception d'objets nouveaux, doués de propriétés spécifiques, propriétés souvent inatteignables avec des systèmes covalents conventionnels. Cette part de créativité fondamentale et l'aspect transdisciplinaire doivent être encouragés. Quelques exemples d'application peuvent être cités ce qui, compte tenu

de la variété des domaines concernés, est évidemment très réducteur. Ainsi des propriétés de reconnaissance entre un récepteur et un invité peuvent conduire avec une grande sélectivité à des systèmes complexes, trouvant des applications tant dans le domaine du vivant (détection, vectorisation, libération contrôlée...), que dans celui des matériaux à propriétés spécifiques ou encore de l'environnement (séparation, détection...). On peut enfin citer le domaine en plein essor des nanomachines. Ces systèmes restituent une propriété collective de molécules ou correspondent à un travail sur une molécule unique. Ils sont éventuellement commutables à l'aide d'un stimulus extérieur comme, par exemple, les moteurs moléculaires à base ou non de systèmes entrelacés. Les applications potentielles sont immenses et touchent, là encore, des domaines très variés comme les capteurs, la logique et l'électronique moléculaires, etc.

## 4 – MATÉRIAUX MOLÉCULAIRES

D'une façon générale, les matériaux moléculaires s'avèrent de plus en plus prometteurs dans différents domaines tels que l'électronique, le magnétisme, la photonique, l'imagerie biologique, la médecine ou le développement durable, en offrant un champ d'action très large dans la conception de matériaux fonctionnels (voire multifonctionnels), de l'échelle des nano- à celle des macro-technologies. L'*électronique*, la *photonique*, la *biophotonique* ou le *magnétisme moléculaire* connaissent actuellement un grand développement.

Dans ce cadre, les chimistes doivent développer une *ingénierie* moléculaire et/ou supramoléculaire ciblée pour des matériaux répondant à un cahier des charges bien précis pour l'application visée. On citera ainsi :

- l'ingénierie de « fonction » destinée à adapter les propriétés (spectroscopiques,

physiques, magnétiques, catalytiques...) des molécules ou assemblages à l'application visée. Bien que dans de nombreux domaines une relation structure moléculaire/propriétés ait été largement établie, l'optimisation des propriétés moléculaires ou l'utilisation de nouveaux outils (par exemple microscopes confocaux à absorption biphotonique) requièrent un investissement important des chimistes molécularistes. À cet égard, la collaboration avec des chimistes théoriciens est généralement primordiale. Par ailleurs, l'engouement pour les systèmes multi-fonctionnels (mise en œuvre dans le même matériau, d'au moins deux propriétés telles que l'opto-magnétique, l'opto-mécanique, la conduction/magnétisme, la luminescence/propriétés d'optique non-linéaire...) résulte de la richesse remarquable des structures moléculaires permises par une chimie organique de synthèse toujours plus performante. De telles associations de propriétés dépassant généralement leur simple juxtaposition, l'étude des propriétés conjointes engendrées pourraient conduire à des fonctionnalités très riches et à de nouvelles applications à exploiter.

- l'ingénierie de « forme » qui doit être réalisée de façon à optimiser les propriétés de la molécule fonctionnelle dans son environnement d'application. Cette phase se place au-delà du choix de la molécule modèle, dont les propriétés microscopiques auront été optimisées en vue de l'application choisie. Ce travail d'ingénierie impliquera une fonctionnalisation des molécules modèle (i) pour le passage au matériau (greffage en matrice sol-gel ou polymère pour la photonique, l'électronique, à la surface de nanoparticules métalliques, de systèmes mésoporeux...) ou (ii) pour la compatibilité aux milieux ou systèmes biologiques visés pour l'imagerie, la thérapie ou le diagnostic (hydrosolubilité, amphiphilie pour l'imagerie au sein des membranes, introduction de fonctions de ciblage). Cette adaptabilité au milieu de fonctionnement devra prendre en compte la modulation des propriétés des molécules dans leur environnement d'application : modification des propriétés de luminescence en milieu biologique, effet plasmon avec les nanoparticules métalliques, inter-

actions moléculaires en matrice sol-gel ou polymère...

D'une façon générale, le devenir des matériaux moléculaires fonctionnels est lié à la mise en œuvre de matériaux non seulement présentant des propriétés de plus en plus sophistiquées, mais également adaptés au cahier des charges en termes de qualité (stabilité thermique, photochimique, innocuité...) en vue d'une utilisation industrielle.

La recherche en France dans le domaine des matériaux moléculaires est bien implantée. En particulier, l'essor des nanosciences est actuellement croissant et le rôle des chimistes et notamment celui de la Section 12 est essentiel dans plusieurs domaines : – conception de « labo sur puce » (« lab on chip ») et conception de microsystèmes pour différentes applications en électronique, optoélectronique, micro-fluidique en lien avec une évolution vers la miniaturisation ; – conception de nanomatériaux intelligents et fonctionnels organiques ou hybrides ; – conception de nanomatériaux pour les sciences de la vie (biologie, thérapie ou diagnostic en médecine) : nanobiosondes pour l'imagerie, nanocargos pour des processus de vectorisation, nanoparticules pour la thérapie...

## 5 – SPECTROSCOPIES

Les avancées majeures réalisées en Sciences Chimiques sont indissociables des évolutions analytiques théoriques et méthodologiques. En effet, les techniques d'analyse ont un rôle essentiel dans le processus de création et d'identification moléculaire dont l'automatisation grandissante explique le regain d'intérêt.

En spectrométrie de masse, des progrès conceptuels et instrumentaux considérables ont été réalisés récemment. Ainsi, le développement d'appareillages à très haute-résolution et de l'imagerie par SM permet de couvrir des applications analytiques aux frontières de la chimie (patrimoine, toxicologie, analyse de

traces...). Parallèlement, les recherches sur les multiples méthodes d'ionisation doivent être poursuivies, car ces outils permettent désormais l'analyse de composés de poids moléculaire important ( $> 100\ 000$ ) via les ions multichargés. De même, des améliorations sur les analyseurs existants (Tof, trappes) ou la conception de nouveaux systèmes restent un défi à relever, en particulier pour les analyses *in situ*, c'est-à-dire sur des mélanges, voire à terme *in vivo*.

En RMN, les cryosondes de mesure multinoyaux ont conduit à des avancées significatives en protéomique, métabolomique, et en chimie structurale ou analytique. En parallèle, de nombreux développements méthodologiques RMN (acquisition rapides ou sélectives, traitements du signal, transferts dynamiques de polarisation) sont activement explorés, et des applications prometteuses en routine sont attendues. L'installation en 2009 du tout premier spectromètre RMN opérant à 1 GHz sur le sol français reste un événement majeur dans la communauté des chimistes et des spectroscopistes. Équipé pour la RMN en solution et du solide, cet appareil parfaitement polyvalent sera capable de relever de nombreux défis analytiques. Dans la mesure où les performances de la RMN du solide commencent à égaler celles du liquide, une harmonisation de ces deux outils, *a priori* si différents, apparaît désormais plausible.

D'autres combinaisons multi-techniques sont proposées actuellement, et devraient conduire à l'apparition de stratégies originales : la RMN en solution couplée à l'HPLC et/ou à la HRMS. Dans le domaine de l'analyse des matériaux composites, hétérogènes ou confinés, le couplage entre la RMN et la microscopie électronique, la diffraction des rayons X ou des neutrons aux petits angles s'améliore sans cesse. À cet égard, la mise en place d'une plateforme nationale proposant un ensemble de spectromètres RMN à hauts champs, équipés de sondes multinoyaux à très fort gradients ( $> 2\ 000\ \text{G/cm}$ ) devrait être envisagée pour répondre aux demandes d'analyse de noyaux « exotiques » dans la matière molle, organisée ou non (polymères, cristaux liquides, liquides

ioniques...). Une telle plateforme offrirait la possibilité d'étudier la dynamique moléculaire à une échelle de temps jamais atteinte jusqu'à présent, un atout important pour comprendre les relations structure-propriétés.

La diffraction des rayons X reste la méthode de choix en chimie structurale lorsque l'obtention des monocristaux est possible. En effet, cette problématique un peu oubliée des chimistes rejoint les préoccupations des biochimistes lors de la purification d'édifices moléculaires de très grande taille, et pourraient répondre à certaines interrogations liées aux phénomènes de polymorphisme.

L'analyse de la chiralité moléculaire reste un enjeu majeur pour les spectroscopies. Le dichroïsme circulaire vibratoire dans l'infrarouge y contribue en permettant une détermination des configurations absolues en combinaison avec la modélisation moléculaire, et le développement de cette technique semble prometteur. D'autres approches analytiques plus généralistes comme la reconnaissance de forme par RMN dans les systèmes organisés chiraux (cristaux liquides, milieux micellaires...) ou encageants sont en émergence.

Très récemment, des études ont montré que la SM de rapport isotopique (SMRI) permettait la quantification de la pureté optique dans le cas de mélanges de quasi-énantiomères isotopiques. Enfin, une telle liste ne saurait être exhaustive sans mentionner les techniques de microscopie de champ proche. Les attentes ultimes des chimistes seraient ici la visualisation *in situ* des atomes, dans l'espoir d'observer la chiralité moléculaire directement, par exemple.

Le développement des outils spectroscopiques et spectrométriques doivent être mené par des équipes ou des laboratoires spécialisés de physico-chimistes organiciens utilisant : i) des équipements mi-lourds propres, ii) des instruments performants accessibles sur les plateformes scientifiques telles que le centre «Synchrotron-SOLEIL», ou les divers sites «TGE-RMN». Quel que soit le mode d'interaction entre chimistes et physico-chimistes, il est souhaitable de tisser des liens synergiques entre ces différents acteurs. Cependant, le soutien de thématiques de recherche propres aux équipes de physico-chimistes doit rester une priorité absolue.

# 13

---

## PHYSICOCHIMIE : MOLÉCULES, MILIEUX

*Président*

Philippe HAPIOT

Mustapha ABDELMOULA

Xavier ASSFELD

Jean AUIPAIS

Marc BAA DEN

Jean-François BERGAMINI

Philippe BERTANI

Daniel BORGIS

Catherine COMBELLAS

Marine COTTE

Odile EISENSTEIN

François GUILLAUME

Bernard LEGUBE

Élisabeth LOJOU

Dimitra MARKOVITSI

Arnaud MARQUETTE

François MAUREL

Keitaro NAKATANI

Jean-Pierre PEREIRA RAMOS

Alain WALCARIUS

Henri WORTHAM

Comme indiquer dans son intitulé, le domaine d'expertise de la section 13 est celui de la physico-chimie, discipline frontière par excellence. Il ressort que les thématiques abordées dans ce rapport de conjoncture couvrent de larges domaines disciplinaires. Nous nous promènerons donc de la chimie théorique, aux spectroscopies, à l'électrochimie et la photochimie, jusqu'aux sciences analytiques et leurs applications vers l'environnement ou le patrimoine. On retrouve au centre de ces activités, la modélisation (un des piliers de la section 13) et le besoin constant de développer de nouvelles méthodologies en rapport avec les avancées récentes. Cette diversité thématique explique la longueur un peu hors norme de ce document.

### 1 – CHIMIE THÉORIQUE

#### 1.1 DE LA MODÉLISATION À LA SIMULATION. UNE DISCIPLINE EN ÉVOLUTION PERMANENTE

La chimie théorique est une discipline de la chimie qui permet de comprendre, d'interpréter et de prédire les propriétés spatiales et temporelles de la matière. Elle donne une description atomistique des phénomènes grâce

à des modèles mathématiques généralement implantés dans des programmes informatiques. Son but est de développer de nouvelles méthodes d'exploration afin de proposer de nouveaux modes d'analyse et d'interprétation des observations expérimentales. Elle a connu un essor exceptionnel lors des vingt dernières années. Son degré d'évolution est tel qu'aujourd'hui elle est considérée comme un outil d'analyse incontournable au même titre que d'autres méthodes physico-chimiques telles que les méthodes spectroscopiques ou chromatographiques, de telle sorte qu'études théoriques et expérimentales sont désormais très souvent associées. Cette évolution rapide s'appuie sur des développements de formalismes, d'algorithmes et de méthodes, ainsi que sur l'augmentation importante de la puissance des ordinateurs qui rendent les calculs réalisables à la fois en un temps acceptable et sur des systèmes de tailles et de natures comparables aux systèmes expérimentaux. La chimie théorique peut même parfois remplacer des expériences particulièrement coûteuses, difficiles ou impossibles à mettre en œuvre. Elle permet aussi de définir les expériences à réaliser pour confirmer ses prédictions, même s'il faut reconnaître que ceci est encore limité en raison de la difficulté d'inclure toute la chimie et la physique des systèmes dans la modélisation. Ceci constitue certainement le défi des prochaines décennies pour cette discipline encore jeune. Si durant le siècle précédent on peut affirmer que la modélisation, s'entend une simplification du problème, était au cœur de son développement, on doit comprendre qu'elle évolue vers la simulation, c'est-à-dire la représentation la plus fidèle possible de la complexité des systèmes. Les productions de la chimie théorique incluent les logiciels (ou les fragments ou compléments de logiciels) qu'elle génère, les méthodes de rationalisation qu'elle propose et la confirmation de ses prédictions.

La chimie théorique, avec son large éventail de méthodologies, est transdisciplinaire par essence, nouant des liens forts avec la physique, et les sciences de la vie, et contribue à la création de concepts. La découverte des règles de symétrie par R. B. Woodward et R. Hoff-

mann ou la DFT conceptuelle et autres outils d'analyse à partir de la connaissance de la fonction d'onde ou de la densité en sont des exemples qui ont révolutionné le mode de pensées en chimie. Ainsi, de manière remarquable, l'apport de la chimie théorique peut être fondamental indépendamment du niveau de sophistication des méthodes utilisées.

## 1.2 LES ÉCHELLES DE MODÉLISATION ET LEURS VEROUS

La chimie théorique doit s'attacher à décrire, interpréter ou prédire les propriétés de la matière et les transformations chimiques à toutes les échelles spatiales ainsi que temporelles. Ceci englobe des réactions élémentaires impliquant quelques atomes dans le vide interstellaire mais aussi la structure, la dynamique et la réactivité des systèmes moléculaires complexes (réactivité et ingénierie moléculaire en solution, catalyse aux interfaces et en milieu biologique, matériaux et nanomatériaux moléculaires, ingénierie des protéines, assemblages biomoléculaires, etc.), jusqu'à l'élucidation de processus réactifs macroscopiques se déroulant dans une puce microfluidique ou dans un réacteur chimique. À chaque niveau de description spatial et temporel correspond un niveau approprié de description théorique : chimie quantique et dynamique moléculaire *ab initio*, mécanique moléculaire avec une description atomistique ou à gros grains, modèles stochastiques ou sur réseau, équations de réaction-diffusion ou hydrodynamiques.

Le domaine de la chimie quantique a atteint une très grande maturité et permet de plus d'inclure les effets de température et donc d'accéder à l'énergie libre à travers ses diverses variantes dynamiques. Le problème du traitement correct de la corrélation électronique reste cependant très ouvert pour un certain nombre de situations physiques importantes (couches ouvertes, états électroniques excités, dégénérescences, magnétisme étendu...) afin

d'établir des propriétés et des grandeurs spectroscopiques précises. La théorie DFT a ouvert la voie à la description *ab initio* de la structure électronique de systèmes étendus (plusieurs centaines d'atomes) se rapprochant de la réalité expérimentale, que ce soit en chimie supramoléculaire, en chimie des solutions ou en catalyse. Elle suscite actuellement de nombreuses recherches méthodologiques pour lever certaines de ses limitations intrinsèques tout en préservant ses avantages remarquables en temps de calcul. L'évaluation des interactions faibles reste aussi un verrou important, car elle nécessite des méthodes très sophistiquées, la plupart du temps incompatibles avec des systèmes de grande taille, pour lesquels ces interactions sont fondamentales. Des efforts importants sont déployés pour développer des méthodes adaptées. Au niveau de description classique, c'est à dire en négligeant le mouvement des électrons, la mécanique moléculaire, développée depuis les années 70 et basée sur des potentiels interatomiques (champs de forces) empiriques ou semi-empiriques, permet aujourd'hui de simuler le comportement de systèmes comprenant jusqu'à quelques centaines de milliers d'atomes pendant plusieurs microsecondes. Elle est utilisée couramment dans les domaines de la physicochimie des solutions complexes, la biologie structurale ou les matériaux et peut être considérée comme un outil de laboratoire. Cependant, les champs de forces sous-jacents doivent encore être affinés et rationalisés (la plupart du temps par des calculs quantiques), en particulier en tenant compte d'interactions plus fines comme la polarisation électronique. Des développements restent nécessaires dans ce domaine pour rendre ces méthodes encore plus précises, notamment sur les systèmes inorganiques. En dépit des limitations, la chimie quantique et la modélisation moléculaire ont conduit à des développements d'outils informatiques qui permettent d'aborder les propriétés des systèmes moléculaires à différentes échelles et sont aisément utilisables dans les laboratoires expérimentaux, au même titre que d'autres instruments ou techniques expérimentales.

Reste la difficulté de l'échantillonnage de la complexité structurale dans les systèmes de

taille importante (les systèmes biologiques, les systèmes amorphes, les solides et surfaces présentant des défauts, les agrégats et les nanomatériaux, les nouveaux matériaux et les environnements au sens large) afin d'obtenir des grandeurs thermodynamiques et cinétiques pertinentes. De nombreuses méthodes systématiques d'exploration de l'espace et de recherche des chemins de réaction ont vu le jour ces dernières années mais leur application à des systèmes étendus comportant un grand nombre de minima d'énergie libre locaux reste un défi. De plus, bien que l'on puisse réaliser la simulation au-delà de quelques nanosecondes d'un système de plus d'un million d'atomes, le traitement des assemblages micrométriques et de la complexité du vivant ou des nanomatériaux composites nécessite de passer de l'échelle atomique à des descriptions dites à gros-grains, où chaque grain représente un groupe d'atomes de taille variable – qui peut aller pour une protéine par exemple d'une portion de résidu à une molécule entière. La modélisation gros-grain est aujourd'hui un domaine en pleine expansion. Un des verrous à lever est la définition de champs de forces effectifs entre grains, réalistes, précis et transférables.

Sur la route vers le macroscopique, il faut noter aussi le développement actuel des simulations mésoscopiques stochastiques (Équation ou Réseaux de Boltzmann, Monte-Carlo cinétique, dynamique brownienne, etc.) permettant de tenir compte de l'effet statistique des fluctuations. Enfin, même dans le domaine macroscopique, dont les équations cinétiques, mécaniques ou hydrodynamiques sont bien établies, se posent aujourd'hui de nouveaux défis comme la description des dispositifs micro/nanofluidiques ou celui du transport ionique dans des milieux complexes comme les argiles, systèmes pour lesquels la structuration microscopique ou mésoscopique sous-jacente est importante.

Pour tenir compte de la complexité croissante des systèmes étudiés, la démarche actuelle est de se placer dans une approche résolument multi-échelle/multi-méthode, que ce soit de façon hybride (couplage entre

méthodes) ou hiérarchique (passage d'informations d'un niveau à l'autre). La mise au point et l'application des méthodologies multi-échelles est actuellement un domaine d'activité intense.

Pour résumer, des verrous méthodologiques pour pouvoir étudier, modéliser et même simuler des systèmes chimiques sont :

- i) la corrélation électronique résultant du problème à N-corps pour la structure électronique de certains systèmes.
- ii) l'échantillonnage de la complexité structurale et dynamique dans les systèmes de taille importante afin d'obtenir des grandeurs thermodynamiques, structurales, spectroscopiques et cinétiques pertinentes.
- iii) la combinaison de différents niveaux de description de la matière (approches hybrides, multi-échelle) afin d'atteindre une représentation fidèle de la complexité physico-chimique.
- iv) des avancées méthodologiques dans le domaine de la dynamique permettant de traiter des systèmes de grande taille en conservant une description quantique pour certains noyaux.

### 1.3 QUELQUES DÉFIS APPLICATIFS DE LA CHIMIE THÉORIQUE

La chimie théorique prend toute sa part dans le développement des thématiques de recherche liées à de forts enjeux sociétaux. On peut en particulier citer :

i) Contribution à la production et au stockage de l'énergie. Comprendre la production et le stockage de l'énergie est un défi particulièrement important pour la chimie théorique. Ces études associent de nombreuses difficultés méthodologiques notables : traitement des états excités, des états redox, de transferts d'électrons, des matériaux soumis à des champs, à des transformations chimiques en profondeur ou en surfaces, traitements des interfaces, réactions hors équilibres.

ii) Contribution à l'analyse et à la chimie propre. La chimie théorique se doit de fournir

des outils pour analyser les données spectroscopiques à haute résolution et ainsi accompagner et interpréter les expériences dans ce domaine. Les applications concernent autant la planète Terre, en particulier les problèmes de stockage et de retraitement de déchets nucléaires, que la chimie des atmosphères et la chimie interstellaire. Les avancées dans ce domaine sont aussi liées au progrès dans l'évaluation des interactions faibles.

Augmenter l'efficacité et la sélectivité des réactions contribue de façon active à rendre la chimie plus propre. La chimie théorique apporte sa contribution par l'intermédiaire de la détermination des chemins de réaction. Les difficultés dans ce domaine concernent la complexité du milieu expérimental et des réactifs et le besoin d'étudier un très large ensemble de possibilités. Dans le cas des réactions sur supports se posent les difficultés de représentation des surfaces et surtout de leur irrégularité.

iii) Contribution aux sciences de vie et à la santé. La chimie théorique est traditionnellement très présente dans ce domaine, soit à travers l'axe de conception rationnelle de molécules actives d'intérêt pharmacochimique, soit à travers la résolution de structures *via* des méthodes de la biologie structurale comme la cristallographie ou la RMN. Il est maintenant avéré que les phénomènes biologiques nécessitent une description de l'évolution dynamique des macromolécules dans leurs environnements complexes. Les systèmes biologiques traités dans ce contexte vont d'une relative petite taille englobant quelques acides aminés jusqu'à des systèmes de très grande taille, tels que les assemblages et machines moléculaires englobant plusieurs millions d'atomes.

### 1.4 LES ATOUTS ET LE POTENTIEL DE LA CHIMIE THÉORIQUE FRANÇAISE

La communauté des chimistes théoriciens français est actuellement bien structurée notamment grâce à l'existence de plusieurs GDR et du réseau français de chimie théorique (RFCT) qui

se déploie sur tout le territoire avec des pôles régionaux. Cette communauté anime une activité scientifique au niveau régional et national. Parallèlement à cet effort de coordination et structuration, une politique nationale active a permis de retrouver récemment une puissance de calcul compétitive grâce à des investissements dans les centres nationaux (IDRIS, CINES, etc.) et au développement de méso-centres Universitaires et régionaux. La création, en 2007, de la société civile GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif) permet d'espérer que cet effort – vital pour la chimie théorique et dans le contexte international très compétitif – sera maintenu dans les années à venir. Il faut également souligner qu'il est important de disposer de moyens informatiques très variés (centres nationaux, régionaux, universitaires, ainsi que moyens locaux dans les instituts et/ou laboratoires) pour optimiser la mise en œuvre de projets de nature très diverse.

La communauté française jouit également d'une bonne visibilité internationale qui se traduit par une forte attractivité de la France pour les théoriciens du monde entier. Ainsi, on constate un recrutement régulier de chercheurs et enseignants chercheurs étrangers de très haut niveau. En contrepartie, la présence de chercheurs français dans des laboratoires phares de la discipline à travers le monde témoigne également de la qualité de la formation française et de l'excellente réputation de nos laboratoires. Actuellement, même si la France n'est pas elle-même porteuse de grands logiciels, la communauté française, par ses développements méthodologiques et leur traduction sous forme informatique, contribue significativement à l'évolution du nombre de ceux-ci.

## **1.5 LES RISQUES POUR LA COMMUNAUTÉ DE CHIMIE THÉORIQUE FRANÇAISE**

Bien que le recrutement de haut niveau soit toujours assuré, il n'en demeure pas moins

que l'enseignement de la chimie théorique souffre de la désaffection croissante des étudiants pour les disciplines scientifiques et en particulier à forte coloration théorique. Au-delà de ce mouvement de fond, l'enseignement est très morcelé sur le territoire et bien souvent, la chimie théorique vit à l'ombre de l'enseignement des sciences expérimentales. En d'autres termes, cette discipline de la chimie ne peut pas avoir les effectifs nécessaires pour justifier la création de formations master de chimie théorique dans de nombreuses Universités. Une réflexion collective doit donc être menée pour mettre en place une structure de formation nationale et/ou régionale.

Le manque de reconnaissance de la chimie théorique se traduit encore bien souvent par la dispersion des forces, le chimiste théoricien étant vu seulement comme un élément de la compréhension de l'expérience et moins comme un artisan d'avancées méthodologiques. Il paraît donc essentiel de veiller à ce que les chimistes théoriciens soient rassemblés en pôles de recherche, ou en réseaux structurés pour promouvoir les avancées méthodologiques et réaliser des applications avec les outils les plus performants.

## **1.6 CONCLUSION**

Ces dernières années ont vu des avancées considérables alliant des progrès méthodologiques avec une meilleure exploitation de calculateurs d'une puissance toujours croissante. La chimie théorique est une thématique phare dont la jeunesse « centenaire » lui laisse augurer un très bel avenir pour encore mieux contribuer à la compréhension de la complexité de la matière et répondre ainsi à tous les enjeux fondamentaux et sociétaux de la chimie moderne.

## 2 – CHIMIE ANALYTIQUE, CHIMIE POUR L'ENVIRONNEMENT, RADIOCHIMIE

### 2.1 CHIMIE ANALYTIQUE

La chimie analytique est la branche de la chimie qui développe et applique des méthodes, des outils et des concepts pour caractériser et quantifier la nature de la matière et son évolution dans le temps et dans l'espace. Elle connaît de nombreuses applications dans des domaines sociaux économiques très divers tels que l'industrie agro-alimentaire, la gestion de l'environnement, la conservation et la restauration du patrimoine, le bio-médical, les fraudes et le dopage, l'industrie pharmaceutique et cosmétique etc. Parmi ces différents secteurs d'activités, ceux de l'environnement et surtout de la biologie et du diagnostic médical font l'objet d'une demande en forte croissance.

Malgré les aspects extrêmement variés des demandes d'analyses, les verrous technologiques à surmonter ont de nombreux points communs. Parmi eux on soulignera :

- la rapidité de la mesure pouvant aller jusqu'à une mesure en continue,
- la quantité limitée de certains échantillons (goutte de sang, fragment d'œuvre d'art...)
- l'analyse sur site pour le bio-médical, l'environnement, les monuments historiques et l'industrie.
- l'automatisation des procédures du prélèvement de l'échantillon, jusqu'à son analyse,
- l'abaissement des limites de détection pour l'analyse de traces et d'ultra-traces
- la spéciation dans des matrices très complexes,
- Le développement de stratégies d'étude de source pour l'identification des origines d'un produit ou d'un contaminant (traçabi-

lité des produits, détermination des sources majeures de contaminants...).

Pour répondre à ces exigences, la chimie analytique utilise tous les outils susceptibles d'apporter des informations non-équivoques pouvant se traduire par une grandeur mesurable. Ainsi, elle s'appuie sur les concepts de la chimie, de la physico-chimie, de la physique et de plus en plus souvent sur ceux de la biologie et de la biochimie.

*Amélioration de la sélectivité et de la sensibilité des méthodes séparatives et analytiques.* Dans les années à venir, la chimie analytique devra faire face à une demande croissante d'information. Pour y répondre, il faudra être capable de développer des systèmes analytiques permettant l'analyse simultanée d'un nombre croissant d'espèces mais aussi d'augmenter la résolution temporelle des analyses en réduisant leurs durées. L'amélioration de la sélectivité ne pourra pas être atteinte en focalisant les efforts que sur une seule étape de la chaîne analytique. La stratégie à adopter est de conjuguer les efforts sur chacune des étapes depuis le prélèvement de l'échantillon jusqu'à l'analyse proprement dite.

*Spécificité des procédures de prélèvement et de traitement des échantillons :* L'analyse des échantillons peut être grandement simplifiée en améliorant la spécificité des étapes de prélèvement et de traitement des échantillons. Ceci peut être obtenu par le développement de nouveaux matériaux mettant en œuvre des interactions très sélectives basées sur la complexation avec des ligands spécifiques (calixarènes, dextrines, aptamères...), la reconnaissance moléculaire (anticorps, polymères à empreinte moléculaire) ou biomoléculaire (enzymes, récepteurs, brins de DNA, protéines...). L'extraction des solutés très polaires et solubles en milieux aqueux reste un challenge scientifique.

*Résolution des systèmes séparatifs :* Les mélanges très complexes ne peuvent être résolus que par l'association de différents modes séparatifs. L'introduction de la chromatographie bidimensionnelle avec analyse sur la deuxième dimension de tout l'échantillon

injecté a permis des avancées spectaculaires. L'effort doit être poursuivi dans le domaine des séparations par chromatographie en phase liquide et/ou électrophorèse capillaire avec en perspective l'analyse protéomique, qui, à ce jour, ne donne accès qu'aux protéines majoritaires.

*Spécificité des détecteurs* : Si d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années sur la sélectivité des systèmes chromatographiques, les avancées technologiques notamment en spectrométrie de masse et sur les interfaces, permettent l'analyse qualitative et quantitative d'analytes à peine résolus ce qui change le concept traditionnel de la mise en œuvre des séparations et atténue la nécessité de résolution absolue des systèmes chromatographiques.

*Bio analyses* : Des gains en spécificités de séparation, de prétraitement de l'échantillon ou de détection pourront être obtenus en faisant appel à des outils biologiques qu'il s'agisse de biocapteurs/biosorbants à base d'enzymes, d'anticorps, de cellule...). Ces technologies présentent l'avantage de permettre des analyses in-situ, continues, rapides et peu coûteuses, pouvant parfois être très spécifique et donner des indications de toxicité. Elles constituent sans aucun doute un mode d'analyse de choix pour les années futures.

*Miniaturisation et microsystèmes intégrés*. La miniaturisation est une étape obligée pour répondre aux exigences économiques et environnementales de réduction de l'usage des solvants organiques et aux besoins d'analyses rapides, fiables et sensibles sur des volumes d'échantillon parfois infimes. Les principales demandes dans ce domaine émanent des milieux médicaux et environnementaux par exemple pour des diagnostics médicaux et des contrôles rapides de la contamination environnementale. Pour être efficace, les microsystèmes doivent intégrer l'ensemble de la chaîne analytique avec le couplage en ligne de toutes les étapes. Ces microsystèmes permettent l'utilisation de réactifs chimiques et/ou biochimiques hautement spécialisés. Cette miniaturisation impose de repenser totalement les différentes étapes de l'analyse. Les

microsystèmes font appel à des technologies telles que les microcanaux et la microfluidique (flux électroosmotique et micropompes) qui demandent des développements particuliers (gels à propriétés spécifiques pour l'électrophorèse, décoration moléculaire de surfaces, modifications de surface de grains de silice pour la chromatographie, combinatoire d'éluants etc.). De même, des développements spécifiques doivent être conduits pour la détection en optimisant les couplages avec la spectrométrie de masse mais aussi en développant de nouveaux capteurs. La technologie utilisée par ces derniers se limite trop souvent à la fluorescence et le développement de microélectrodes faisant appel à l'électrochimie et/ou la biologie sont des voix prometteuses.

*Mesure in situ et in vivo*. La sécurité alimentaire, la surveillance de la qualité de l'environnement (air, eau, sol), le contrôle des effluents gazeux et liquides, etc., requièrent un nombre sans cesse croissant d'analyses avec des temps de réponse de plus en plus courts qui ne sont compatibles qu'avec des analyses sur site. L'objectif de ces analyses étant généralement en relation avec la recherche d'espèces potentiellement toxiques, on assiste depuis quelques années à l'émergence de nouvelles méthodes d'analyse qui associent les principes de la chimie, la biochimie et l'immunologie. Contrairement aux tests de toxicité qui évaluent des niveaux de toxicité, les méthodes bioanalytiques donnent une mesure de concentration pour une substance (ou un groupe de substances) en utilisant l'outil biologique. Elles comportent une procédure d'étalonnage et doivent subir les mêmes tests de validation que n'importe quelle méthode analytique. Les bioanalyses les plus communément utilisées sont les immunoessais basés sur la reconnaissance de structure et les tests d'inhibition enzymatique basés sur la reconnaissance d'un mode d'action.

Les biocapteurs partent de ces mêmes principes dans leur conception et sont des méthodes de mesure de choix pour le futur car peu coûteuses, utilisables in-situ et permettant des mesures rapides et en continue. Les travaux actuels concernent essentiellement

l'immobilisation des éléments biologiques et permettent une miniaturisation des dispositifs. Les bénéfices apportés par ces travaux sont spectaculaires puisque la réduction des distances à parcourir par les molécules dans les microsystèmes a permis une forte réduction des temps d'analyse qui sont passés de quelques heures pour des analyses sur microplaques à moins de 10 minutes. Ces travaux sont souvent conduits sans considérer leur intégration avec les phases de préparation et de séparation pourtant nécessaires à tout traitement d'échantillon ou de prélèvement brut. Les biocapteurs enzymatiques avec détection électrochimique sont les plus étudiés et un effort doit être porté aux biocapteurs immunochimiques utilisant des transducteurs optiques ou piézo-électriques.

La technologie actuelle permet le développement de biocapteurs multirésidus, par inclusion dans le capteur d'une série d'anticorps dirigés contre plusieurs composés cibles. Une autre piste de concept analogue est prise actuellement avec des matériaux à empreinte moléculaire capables de mimer des anticorps ou des récepteurs. Ces matériaux artificiels sont très prometteurs car ils peuvent être synthétisés soit par ingénierie moléculaire ciblée soit par chimie combinatoire orientée. De plus, ils permettent la mise en œuvre de fonctionnalités difficiles à obtenir avec des anticorps naturels ce qui donne accès à un ciblage des effets biologiques. Enfin, on notera que quelques biocapteurs utilisent des organismes vivants unicellulaires tels que les bactéries, les levures ou même des champignons. Le principe de la détection exploite alors les fonctions de métabolisme de ces organismes.

Les avancées en chimie analytique reposent sur une multiplication des axes de recherche impliquant par exemple la microfluidique et de plus en plus d'étapes de bioanalyse. Le chimiste analyste doit donc collaborer fortement avec des toxicologues et biologistes pour la conception des outils biologiques, avec les physiciens et les spécialistes des sciences pour l'ingénieur pour la conception des microsystèmes et la microfluidique, des chimistes polyméristes pour la synthèse des

phases spécifiques de prélèvement et de fractionnement des échantillons. Sans oublier les demandeurs, spécialistes de l'environnement, de l'agroalimentaire, etc.

*Enseignement.* En chimie analytique, de nombreux MASTERS professionnels et écoles d'ingénieurs existent avec une distribution homogène sur le territoire. Toutefois, ces formations se limitent trop souvent à décrire et à appliquer les méthodes existantes. Elles incluent rarement la compréhension des phénomènes qui constituent souvent l'étape initiale indispensable aux développements de nouveaux concepts. Les MASTERS dédiés à la recherche en chimie analytique sont beaucoup moins nombreux d'autant que certains d'entre eux, dédiés aux développements instrumentaux, relèvent de la physique en abordant des thèmes tels que la microfluidique et le traitement du signal.

## 2.2 CHIMIE ET/POUR L'ENVIRONNEMENT

L'activité humaine conduit à une contamination croissante de l'environnement naturel et anthropisé. Ainsi, l'eau douce et les environnements côtiers sont menacés à divers titres et toutes les études sur le développement durable prévoient des pénuries importantes d'eau de qualité au cours des prochaines décennies.

De la même façon la pollution de l'air intérieur et extérieur peut avoir des conséquences environnementales graves comme par exemple le changement climatique et le trou dans la couche d'ozone mais aussi des conséquences sanitaires importantes. À titre d'exemple, une analyse épidémiologique récente de l'OMS a estimé que l'exposition aux particules atmosphériques réduisait l'espérance de vie statistique moyenne d'environ neuf mois dans les pays de l'UE-25, équivalant approximativement à 3,6 millions d'années de vie perdues ou à 348 000 décès prématurés chaque année (Rapport CAFE, 2005).

La chimie doit prendre en compte l'attente citoyenne en matière de protection de l'air et de l'eau. Elle doit rapidement apporter une contribution de plus en plus significative au retour vers une bonne qualité de l'environnement atmosphérique et aquatique. Associée à d'autres champs disciplinaires (sciences de la terre, sciences de la vie, sciences pour l'ingénieur, météorologie), la recherche en chimie doit devenir une des disciplines leaders pour la protection de l'environnement de l'homme. Ceci est envisageable, non seulement, au niveau du concept de chimie verte, mais aussi au niveau de sa participation aux technologies plus performantes de traitement et d'épuration des effluents liquides et gazeux et à l'amélioration des connaissances sur la chimie des milieux aquatiques et atmosphériques, en termes de suivi et de compréhension des phénomènes.

*Chimie analytique.* Une métrologie qui s'appuie sur une chimie analytique fiable, précise et sensible, est un outil indispensable à une bonne gestion de l'environnement. Elle est particulièrement nécessaire pour :

- l'appréciation de la qualité des atmosphères intérieures (domestique et industrielle) et extérieures et des eaux naturelles douces et marines ;

- l'identification et la quantification d'espèces organiques et inorganiques toxiques présentes dans l'air et l'eau

- au suivi de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine

- au contrôle de la qualité des effluents gazeux et liquides ;

- au diagnostic de fonctionnement des procédés (traditionnels et en développement) de traitement des eaux et des gaz mais aussi d'épuration des effluents gazeux et aqueux.

*Traitement et dépollution.* La gestion de la qualité de l'eau et de l'air passe inévitablement par la maîtrise des procédés de traitement des effluents gazeux et liquide. Ces traitements peuvent être physiques (filtrations des particules en suspension), biologiques (essentiellement pour le traitement des eaux) ou chimiques (photochimie, catalyse ou photo-

catalyse). Compte tenu de la diversité des pollutions observées et des d'effluent à traiter, des travaux doivent être poursuivis pour ces trois modes de traitement. Ces travaux doivent s'accompagner d'études mécanistique permettant la caractérisation de la nature et de la toxicité des produits de dégradation certains d'entre eux pouvant parfois être plus toxiques que les produits parents.

*Connaissance du milieu et compréhension des phénomènes.* Une gestion adaptée de l'environnement requière une connaissance approfondie de ce dernier et des phénomènes qui le régissent. Il est notamment nécessaire de connaître les constantes de vitesse de dégradation (ou de formation) des contaminants et les temps de vie qui en résultent.

Pour être efficace, la réduction des émissions doit être ciblée sur les activités les plus productrices de contaminants. Des méthodologies d'identification quantitative de l'influence des différentes sources doivent donc être développées et validées pour chaque grande catégorie de contaminant comme par exemple les aérosols ou les composés organiques volatils dans l'atmosphère. Les traceurs étant rarement mono-sources, les méthodologies les plus efficaces mettent en œuvre des batteries de traceurs analysés à l'émission et dans le milieu atmosphérique ou aquatique. Les résultats sont ensuite traités à l'aide d'outils statistiques appropriés.

*Enseignement.* Les formations dédiées à l'environnement sont nombreuses tant en École d'ingénieur qu'en MASTER professionnels et recherche. La majorité d'entre elles est consacrée à l'eau. L'étude de l'environnement relevant de diverses disciplines (chimie, biologie, géologie...), ces formations sont pluridisciplinaires et la chimie, sans être marginale, est une discipline parmi d'autres. Il manque de formations de chimie dédiées à l'environnement. La mise en place de telles filières serait pourtant un moyen efficace d'améliorer la position de la chimie dans les études environnementales.

## 2.3 RADIOCHIMIE

Les domaines couverts par la radiochimie vont de l'étude des propriétés physicochimiques des radionucléides (RN) en solution, aux interfaces et dans les solides, aux effets des rayonnements induits par les RN et jusqu'à l'étude des propriétés de la matière elle-même dans les domaines de la cosmologie et de la physique nucléaire (stabilité nucléaire, synthèse d'éléments très lourds, etc.). Les domaines couverts par cette discipline dépassent largement son champ habituel d'investigation (amont et aval du cycle du combustible), en particulier : la protection de l'homme et de l'environnement ; l'utilisation des radionucléides en médecine ; l'utilisation des traceurs radioactifs naturels pour l'étude des transports de matière et de sa dynamique (océanologie, [paléo]-climatologie, atmosphère, hydrogéochimie des sols), et pour dater des échantillons historiques ou naturels (archéologie, géologie).

La relance des programmes pour l'énergie nucléaire dans le monde en accord avec une gestion durable des ressources devient un des enjeux majeurs de la société. Ceci se traduit par un effort important à faire dans nombre de domaines couverts par la radiochimie, et certainement pas seulement les cycles amont et aval du combustible. En particulier, la problématique de sûreté des générateurs de quatrième génération et leur impact environnemental et sanitaire sont dors et déjà inclus dans les programmes de recherche. Ces programmes englobent la mise au point de nouveaux combustibles, la séparation pour le retraitement en utilisant des solvants respectueux de l'environnement, la compréhension des mécanismes de migration/rétention dans les stockages géologiques profonds et en surface en considérant tous les aspects du problème (chimie de sorption, dissolution réductrice et oxydante, effet des bio-organismes et du vivant d'une manière générale).

*Les acteurs.* Pour le CNRS, les laboratoires concernés sont principalement présents dans l'Institut Nationale de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) : Il s'agit

de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO), de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL) et le Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées de Nantes (SUBATECH). D'autres laboratoires CNRS ont une activité importante de radiochimie : le laboratoire de Chimie Nucléaire Analytique et Bioenvironnementale (CNAB), l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg (IPHC) et depuis 2007 le nouvel Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM). Environ 150 personnes travaillent en radiochimie également réparties en chercheurs/enseignants, IT et non permanents (thésards, post-docs).

Pour les universités (Paris, Nice, Montpellier, Nantes) la radiochimie représente moins d'une trentaine de chercheurs. Pour le CEA, la radiochimie est une discipline incontournable et représente plusieurs centaines d'agents. Les laboratoires CNRS possèdent des champs de recherches assez distincts les uns des autres mais qui couvrent, à l'instar du CEA, tous les domaines de la radiochimie nécessaires à :

- l'amont et l'aval du cycle (IPNO et l'IPNL) ;
- la gestion des déchets et leur altération (SUBATECH) ;
- l'étude des effets des bioorganismes sur la rétention/migration des RN (CNAB) ;
- la datation et l'utilisation des traceurs géochimiques (CNAB) ;
- l'étude des nouvelles classes de solvant pour la gestion des combustibles irradiés (IPHC) ;
- l'élaboration des nouvelles technologies associées à l'amont et l'aval du cycle pour un développement durable dans le domaine de l'énergie nucléaire (ICSM).

Avancées et perspectives. La dissémination des radiochimistes dans les deux grands organismes que sont le CNRS et le CEA ainsi que dans les universités crée des liens forts entre les chercheurs des divers organismes qu'on retrouve dans les sources de financement des GNR du Programme sur l'Aval du

Cycle et la production d'Énergie Nucléaire (PACEN). La gestion des déchets nucléaires, incluant leur devenir et leur impact environnemental et sanitaire, est couverte :

- par le GNR GEDEON (Gestion des DEchets et Production d'Énergie par des Options Nouvelles) ;

- par le GNR MATINEX (MATériaux Innovants en conditions Extrêmes) pour les matrices de combustible et des déchets de retraitement ;

- par le GNR PARIS (Physicochimie des Actinides et des Radionucléides aux Interfaces et en Solutions) : programmes à caractères fondamentaux visant à obtenir des données cinétiques, thermodynamiques et phénoménologiques ;

- par le GNR FORPRO (FORmations géologiques PROfondes) pour l'étude des transferts eau-gaz-solutés dans les formations géologiques profondes où sont stockés les déchets nucléaires ultimes ;

- par le GNR TRASSE (Transfert des Radionucléides dans le Sol, le Sous-sol et vers les Écosystèmes) pour le transfert des RN dans les sols, sous-sols et d'une manière générale dans les écosystèmes pour une évaluation sanitaire et écologique de l'impact des produits issus de l'industrie nucléaire.

Ceci montre une très grande structuration de ces programmes de recherche. Des nouveaux outils dédiés aux RN sont depuis peu de temps opérationnels : il s'agit de la ligne de lumière MARS (Matière Radioactive à Soleil) sur le synchrotron SOLEIL pour la caractérisation structurale et le nouveau cyclotron dédié à la fabrication des RN et à la radiolyse alpha : ARRONAX à l'École des Mines de Nantes. Il est à noter également un développement très notable de la modélisation théorique dans tous les domaines de la radiochimie, que ce soit en thermodynamique des solutions (chimie quantique et dynamique moléculaire), en modélisation des fluides dans les sols, en chimie structurale et pour prédire les comportements chimiques d'éléments très peu connus comme l'astate ou le protactinium. Il est clair

que la part de la modélisation théorique sera de plus en plus importante grâce à l'existence de centres dédiés aux très grands calculs (par exemple le TGCC [Très Grand Centre de Calcul] à Bruyères-le-Châtel qui devrait voir le jour en 2010). Il reste néanmoins un grand challenge nécessaire pour résoudre tous les grands problèmes liés aux applications et conséquences environnementales de l'utilisation du plutonium et permettre d'aller jusqu'à une prédiction fiable de son comportement : sa description théorique. Il est à espérer que la conjonction des grands instruments maintenant disponibles et la capacité accrue en puissance de calcul permettra une avancée significative dans les années à venir.

*Enseignement.* Le constat donné lors du précédent rapport de conjoncture est hélas toujours d'actualité ; à savoir une désaffection importante des étudiants pour cette discipline, jugée difficile et peu attractive d'un point de vue scientifique. La difficulté à trouver d'excellents candidats pour des thèses est toujours vraie, ce qui conduit les établissements d'enseignement à internationaliser leur formation. Ainsi, pour les deux masters de radiochimie existant en France (un à l'Université Paris XI Orsay et l'autre à l'Université Montpellier II), la formation dispensée est maintenant disponible en anglais. Cette démarche a commencé progressivement en 2009 dans les deux masters avec des supports de cours en anglais. Dès la rentrée 2010, au moins un des deux masters dispensera la totalité de ses enseignements en anglais. Il permettra d'étendre le vivier des étudiants.

### 3 – ÉLECTROCHIMIE

Les réactions de transfert de charge jouent un rôle majeur dans de nombreux domaines de la chimie et constituent le fondement même de processus bioénergétiques vitaux dans la Nature (respiration, photosynthèse, etc.). L'électrochimie permet grâce au potentiel de l'électrode, c'est-à-dire de l'énergie libre

d'une réaction, un contrôle fin des processus initiés par un transfert d'électron. Cette maîtrise qui s'étend de l'échelle nano au macroscopique, autorise aussi bien l'étude des mécanismes réactionnels intimes de la chimie, la préparation ou transformation sélective de matériaux ou de surfaces, la production d'énergie et fait de l'électrochimie un outil analytique puissant. Cette diversité thématique explique que la discipline soit présente dans de nombreux thèmes de recherches prioritaires et répartie sur plusieurs sections du comité national (principalement 13 et 14 pour la chimie).

En dépit de ces constats, le poids de l'électrochimie dans la recherche et l'enseignement de la chimie a eu tendance à décliner au cours des dix dernières années bien qu'elle ait été associée à des domaines en forte expansion tels que les nanotechnologies et le développement de l'analyse par reconnaissance moléculaire ou biomoléculaire. On est en droit de se demander pourquoi. Ce n'est certainement pas une question de valeur tant de nombreuses équipes françaises sont des leaders incontestés au plan international (notamment en électrochimie moléculaire, bioélectrochimie, électrochimie analytique, ultramicroélectrochimie, énergie). On aurait pu avancer une explication liée à l'éclatement de la discipline au niveau des instances d'évaluation, mais ceci est largement contrebalancé par une structuration active initiée par la base au travers, notamment, du Groupe Électrochimie de la SCF, du Groupe Français de Bioélectrochimie, ou de l'action motrice des électrochimistes en termes de création de GDR. Finalement, en observant ce qui se passe actuellement à l'étranger où une réelle prise de conscience de l'importance de l'électrochimie se manifeste, tant au point de vue fondamental qu'appliqué, force est de constater que les pouvoirs décisionnels en France n'ont pas encore franchi ce palier. Notons par exemple les efforts récents en Allemagne de création de centres d'excellence et de structures fédératives dans le domaine de l'électrochimie (investissements de plusieurs dizaines de millions d'euros).

### 3.1 RÉACTIVITÉ MÉCANISME RÉACTIONNELS –ÉLECTROSYNTHÈSE

La compréhension des mécanismes réactionnels reste un enjeu fondamental de l'électrochimie moléculaire dans lequel les équipes françaises possèdent un savoir-faire reconnu au plus haut niveau international. Cette importance s'explique par les développements non seulement en chimie, mais aussi dans d'autres disciplines telles la science des matériaux ou la biologie moléculaire. Les avancées récentes les plus notables vont dans deux directions : d'une part, l'analyse des mécanismes de réactions complexes (électrochimiques ou non) se produisant en solution ou au niveau d'une interface et d'autre part, le développement des outils et méthodes.

Pour le premier point, des aspects fondamentaux de la réactivité chimique sont concernés : par exemple les transferts concertés  $e^- - H^+$ , la communication intramoléculaire dans les systèmes organiques et organométalliques conducteurs, la réactivité des intermédiaires chimiques dans les milieux non conventionnels comme les liquides ioniques basse température ou les sels fondus, etc. Un autre axe important concerne la chimie du vivant. L'électrochimie permet par exemple d'étudier des propriétés redox du centre actif d'une enzyme ou de ses modèles biomimétiques et d'analyser son mode de fonctionnement.

Au sujet des outils, les développements les plus spectaculaires concernent l'accès à l'échelle micro puis nano, que ce soit pour l'étude de phénomènes se produisant en solution ou à une interface. Depuis plusieurs années, l'utilisation d'ultramicroélectrodes, puis de nanoélectrodes, a permis d'accéder à la réactivité dans des milieux identiques à ceux utilisés en chimie classique et à la gamme de temps de la nanoseconde. Les possibilités de ces méthodes dans un milieu inhomogène permettent d'appréhender la réactivité chimique à une échelle très locale ouvrant de nouveaux champs d'investigation et autorisant l'élaboration et la caractérisation de nano objets,

comme les supra et les supermolécules, les assemblages moléculaires, les dendrimères, etc. L'électrode peut être utilisée comme sonde locale de concentrations ou pour l'analyse du fonctionnement dynamique d'objets chimiques (interfaces, surface de catalyseur, grains ou particules réactives, etc.) ou vivants (cellules). En parallèle au travail expérimental, ces recherches sont accompagnées par les développements théoriques nécessaires et concernant les processus de diffusion-réaction à des échelles de longueur nano-, micro- pour les systèmes confinés ou à structures définies. Notons également l'importance de la catalyse assistée électrochimiquement qui permet de concevoir des outils analytiques ou d'accélérer des réactions lentes par électrocatalyse.

Parallèlement à l'investigation des réactions initiées par un transfert électronique, l'électrochimie offre de nombreuses possibilités pour la construction ou l'agencement de nouvelles molécules ou la réalisation de nouvelles interfaces fonctionnelles (capteurs, actionneurs, etc.). Concernant la chimie en solution, il s'agit principalement de s'inspirer des résultats obtenus en électrochimie moléculaire ou en électrosynthèse afin de les appliquer à la chimie organique ou inorganique. Des développements nouveaux concernent l'utilisation des liquides ioniques à basse température en électrochimie moléculaire et sont susceptibles de dégager de nouvelles voies de synthèse en chimie « verte ». Le liquide ionique est à la fois le solvant et l'électrolyte support. Un autre volet important concerne l'élaboration de matériaux et de structures moléculaires, composites ou hybrides. En participant à la compréhension de systèmes de plus en plus « complexes » (nanomatériaux, systèmes biologiques, édifices supramoléculaires), l'électrochimie permet en retour l'élaboration de systèmes de nouvelle génération dont les propriétés ne correspondent plus à une simple « sommation » des propriétés de leurs composants élémentaires isolés.

### 3.2 ÉLECTROCHIMIE LOCALISÉE – NANOSCIENCES

L'avènement des ultramicroélectrodes combiné au développement des microscopies en champ proche a permis l'essor du microscope électrochimique, un outil indispensable pour la caractérisation de processus physico-chimiques ou électrochimiques à des interfaces. Son champ d'applications s'étend des matériaux (catalyse, corrosion) à la biologie (cellules vivantes, biopuces). Il permet également d'initier un grand nombre de réactions chimiques et électrochimiques sur divers types de matériaux (éventuellement isolants).

Un développement récent concerne la fonctionnalisation locale et précise de surfaces actives en combinant les principes des réactions développées pour l'électrosynthèse de matériaux à l'échelle macro et l'ultramicroélectrochimie. Les domaines d'application sont très variés : électronique moléculaire (molécules redox pour les mémoires moléculaires, les matériaux nanostructurés en photovoltaïque, transistors organiques, OLEDs, etc.) matériaux et biomatériaux pour capteurs, matériaux fonctionnels « intelligents », etc.

De plus en plus d'électrochimistes de la section 13 abordent des problématiques liées à l'établissement de relations structure/propriété et/ou structure/réactivité au sein des milieux confinés (électrodes modifiées, polymères, mono- et multicouches organisées...). D'une part, les méthodes électrochimiques sont des outils bien adaptés pour aborder ces systèmes et très compétitifs vis à vis de méthodes plus « lourdes » (telles que l'AFM ou la STM). D'autre part, l'électrochimie peut être mise à profit pour structurer les surfaces d'électrodes, notamment par électrogénération de dépôts métalliques, électroactifs, semi-conducteurs, ou même sol-gel, au travers d'assemblages tridimensionnels de nanoparticules ou de phases lyotropes cristallines servant de « moules » pour l'obtention de méso- et macropores organisés.

### 3.3 ÉLECTROANALYSE – BIOÉLECTROCHIMIE

Les méthodes électrochimiques présentent un intérêt majeur pour de nombreuses applications analytiques et environnementales car elles permettent la transduction simple d'une information chimique, biologique, biochimique (caractéristique d'un analyte cible) en une information électrique (potentiel, courant) facilement exploitable. Contrairement à des techniques (souvent plus lourdes) de laboratoire, l'électrochimie peut être bien adaptée au dosage direct en milieu réel, tant dans le contrôle de la qualité des eaux (polluants émergents, perturbateurs endocriniens, pesticides, etc.) qu'en analyse biomédicale. L'essentiel de la recherche dans le domaine porte sur la miniaturisation (micro et nanotechnologies) et sur l'augmentation de la sélectivité et sensibilité, avec un accent de plus en plus marqué sur la biologie.

Concernant la miniaturisation des dispositifs, il est notable que les techniques électrochimiques sont pour la plupart sensibles aux gradients de concentration et non à la quantité de matière. Cette propriété intrinsèque est un extraordinaire avantage lorsque l'on cherche à miniaturiser et donc que les quantités à détecter sont réduites. La mise au point de méthodes cinétiques capables de lire une information locale (femtoL), et qui s'appuient sur les concentrations devrait permettre des avancées spectaculaires dans des domaines cruciaux comme la compréhension des mécanismes du vivant. L'association entre micro- (nano-) électrochimie analytique et la microfluidique représente aussi un apport considérable. Les électrochimistes s'efforcent également d'atteindre une détection simultanée, directe et in situ, de plusieurs analytes sans perturber le système vivant et il semblerait que seuls les réseaux de microcapteurs électrochimiques soient capables d'apporter une solution à un tel problème.

Pour améliorer la sélectivité d'une électrode, la stratégie retenue consiste à fonctionnaliser l'interface par le greffage ou l'immo-

bilisation de récepteurs ou de catalyseurs chimiques, biochimiques ou biologiques permettant une reconnaissance moléculaire. Le développement de ce domaine très actif en France, implique différents champs disciplinaires de la chimie (procédés sol-gels, polymères spécifiques, dendrimères, etc.) et de la biologie (antigènes spécifiques, immunodosages, enzymes redox ou cascades d'enzymes, etc.). Un autre objectif concerne le développement de nouveaux modes de transduction (ex : électro-chimiluminescence ou mesures impédimétriques sans marquage et sans réactifs) permettant l'obtention de seuils de détection femto voire attomolaire.

Un autre axe émergent est focalisé sur le développement durable avec la production d'énergie électrique par bioconversion électro-enzymatique. De plus en plus de laboratoires s'intéressent au développement des biopiles produisant de l'énergie électrique à partir de la conversion enzymatique de glucose et d'oxygène, avec des applications dans les domaines de l'alimentation ou de l'électronique portable (GPS, téléphonie mobile, micro-ordinateurs, etc.).

### 3.4 STOCKAGE- TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

Les défis soulevés par la volonté de s'affranchir progressivement des sources d'énergie carbonées et d'éviter de s'adonner au tout nucléaire, avec ses redoutables problèmes de déchets, conduisent à relancer un vigoureux développement de l'énergie solaire avec tous les problèmes de stockage ainsi engendrés. D'où l'intérêt soulevé par l'oxydation de l'eau, produisant oxygène et protons, par la réduction des protons en hydrogène et aussi par le stockage d'énergie par réduction de CO<sub>2</sub>, par voie électrochimique et/ou au moyen de l'hydrogène produit. C'est ici que l'électrochimie a un rôle renouvelé à jouer, tant sur le plan fondamental qu'appliqué. L'exploitation de l'énergie du spectre visible

peut en effet conduire à la transformer en électricité avant que les opérations précédentes soient menées. Ici, comme dans beaucoup d'autres cas, ces réactions électrochimiques nécessitent d'être catalysées. Leur catalyse moléculaire, homogène ou supportée, fait appel principalement aux complexes de métaux de transition. À cet égard, il est dommage que l'essentiel de l'électrochimie moléculaire se trouve en Section 13 alors que la chimie de complexes de métaux de transition se trouve en Section 14. L'inspiration biomimétique est, dans ce domaine, importante, comme c'est le cas avec le classique Photosystème II, mais n'est pas obligatoire.

Le domaine des générateurs électrochimiques est sans conteste un des secteurs les plus importants des applications de l'électrochimie. La demande toujours croissante de sources d'énergie autonomes fait de la mise au point d'accumulateurs électrochimiques performants un enjeu majeur. Paradoxalement, l'implication des électrochimistes dans ces thématiques de recherche est relativement faible et ce sont surtout des chimistes du solide pour les accumulateurs lithium-ion et des métallurgistes pour les accumulateurs alcalins qui constituent la plus grande part de la population de chercheurs. Sur ces thématiques très pluridisciplinaires, une participation plus importante de nos collègues serait bienvenue pour donner plus de pertinence aux interprétations des comportements électrochimiques qui, souvent empiriques et pas assez abouties, limitent de ce fait l'établissement d'une véritable corrélation entre propriétés électrochimiques et propriétés structurales. Des avancées sur le plan fondamental et sur le plan appliqué seraient ainsi certainement permises. Des apports de poids sont notamment attendus au niveau des mécanismes de réaction (cinétique, thermodynamique) et de vieillissement des matériaux d'électrodes en fonctionnement. Les problèmes de la réactivité des interfaces électrode-électrolyte (dégradation, solubilité, passivation, etc.) et des contacts interparticules notamment en électrodes composites, lesquels s'ajoutent à la fatigue structurale des matériaux d'électrodes, sont souvent négligés ou peu étudiés de manière approfondie. Au niveau

des déterminations des propriétés de transport du lithium et de l'hydrogène dans le solide, une dispersion considérable des résultats nuit à l'établissement de conclusions fiables et nécessite là aussi des efforts d'implication de notre communauté en sciences des matériaux. Enfin l'aspect simulation doit être pris en compte à travers une réflexion commune avec les chimistes théoriciens, les électrochimistes et les chimistes du solide pour établir des modèles permettant d'élucider les comportements observés, voire les prédire.

## 4 – SPECTROSCOPIES, PHOTOCHEMIE

Nous examinons ici les activités qui ont trait à l'interaction du rayonnement électromagnétique avec des systèmes moléculaires. Au centre nous trouvons diverses méthodes spectroscopiques faisant intervenir la lumière ultraviolette (UV), visible ou infrarouge (IR) en absorption ou en émission ainsi que la photochimie classique, dans le sens des réactions induites par la lumière. Côté hautes énergies, le panel s'enrichit par des spectroscopies utilisant l'UV lointain jusqu'au rayonnement X.

La grande majorité des travaux a pour objectif de sonder divers systèmes moléculaires, allant du matériau à la molécule unique, dans leur état fondamental. Comprendre les processus induits par absorption de photons constitue le cœur de la photochimie au sens large. Une partie importante de la communauté est préoccupée par la conception et la mise en œuvre de nouveaux systèmes photoactifs ainsi que par la photochimie préparative.

### 4.1 SONDER LA MATIÈRE

La majorité des techniques spectroscopiques cherchent à sonder la matière dans son

état fondamental. Celles-ci (Raman, EXAFS, diffusion neutronique...) scrutent une propriété intrinsèque du système étudié ou utilisent une sonde (par exemple fluorescente) dont le comportement est altéré par son environnement local. Ces deux approches sont exploitées pour des systèmes comportant un grand nombre de molécules pour lesquels les informations obtenues sont d'ordre statistique. On assiste parallèlement à une véritable explosion des techniques d'imagerie spectroscopique (Raman, SERS, infrarouge, hyper-Rayleigh, fluorescence, STED...) dont la résolution spatiale s'améliore de façon permanente jusqu'à atteindre le nanomètre. Ces dernières feront de plus en plus appel aux couplages entre spectroscopie, microscopie optique et microscopie en champ proche (AFM, SNOM...).

Décrire de façon fine les interactions entre différentes parties des molécules qui déterminent les structures secondaires ou tertiaires de systèmes biologiques est devenu un enjeu important des travaux en jet supersonique. Ainsi, peptides, sucres et composants d'ADN sont mis en phase gaz et étudiés par des techniques telles que la double résonance, dans le but de valider des modèles théoriques pouvant servir pour des simulations de dynamique moléculaire de gros systèmes. Des études spectroscopiques en phase gazeuse cherchent aussi à comprendre la reconnaissance chirale.

## 4.2 CARACTÉRISER LES PROCESSUS PHOTO-INDUITS

La caractérisation des processus fondamentaux déclenchés par absorption des photons constitue un des axes importants de la communauté. Les développements instrumentaux et méthodologiques donnent la possibilité d'obtenir une vision directe de certains phénomènes. Côté molécule unique, il est possible de suivre les états électroniques successifs d'un système moléculaire. Grâce à la spectroscopie femtoseconde, il est de plus en plus question

de battements quantiques, d'intersections coniques ou de transferts d'énergie ultrarapides. Les spectroscopies X et infrarouge avec résolution femtoseconde sont en passe d'ouvrir de nouveaux horizons mais les physico-chimiques français n'y sont pas beaucoup impliqués pour le moment. L'utilisation des impulsions attoseconde permettra l'observation directe d'orbitales moléculaires. Mentionnons également le contrôle cohérent des réactions photochimiques, qui cherche à canaliser l'évolution d'un système vers une des voies possibles. Bien évidemment une caractérisation approfondie des propriétés spectroscopiques et/ou photochimiques de divers systèmes moléculaires est un point clé en vue de leur utilisation dans diverses applications (voir 1.4). Par ailleurs, la compréhension des phénomènes naturels induits par le rayonnement, tels que l'apparition de mutations cancérogènes (photophysique – photochimie de l'ADN), la vision, les processus photo-induits dans les protéines (par exemple la Green Fluorescent Protein) le mouvement de certaines bactéries mobilisent de plus en plus de physico-chimistes. Ici la difficulté est d'établir un dialogue fructueux avec les biologistes.

## 4.3 EXPLOITER LES PROCESSUS PHOTO-INDUITS

Les processus photo-induits sont exploités aussi bien à des fins de synthèse et de structuration de matériaux que pour stimuler des systèmes fonctionnels. La disponibilité et la transportabilité du rayonnement, ainsi que la rapidité de ces processus sont à l'origine de leur attractivité.

On assiste aujourd'hui à un renouveau de l'intérêt pour la photochimie préparative en tant que moyen de transformation dans le domaine de l'environnement : utilisation de l'énergie solaire dans la dépollution et développement de la chimie verte.

La recherche de photocatalyseurs efficaces, actifs dans le visible et stables dans les

conditions du milieu réactionnel, la compréhension des mécanismes de minéralisation des polluants, tout en veillant à la caractérisation de la toxicité des intermédiaires, sont autant de problématiques scientifiques. La transposition des mécanismes observés en laboratoire vers des conditions naturelles constitue un défi pour répondre aux questions environnementales.

La fabrication et la structuration de matériaux font également intervenir des processus photo-induits, à commencer par la production de nanoparticules par des lasers continus ou pulsés (pyrolyse, ablation). Le contrôle de la taille, de la forme et les propriétés spécifiques qui en découlent sont autant de sujets mobilisateurs. Les phénomènes de photo-structuration et de photo-migration sont des moyens d'action pour créer des structures périodiques (réseaux holographiques, cristaux photoniques...), recherchées notamment pour leurs propriétés optiques. Dans ce domaine on trouve aussi bien des polymères préparés par voie photochimique que d'autres types de matériaux, amorphes ou cristallins, contenant des unités photo-actives. Pour ce qui concerne la recherche des dispositifs commutables, les matériaux photochromes continuent à jouer un rôle majeur dans des systèmes où la réversibilité est requise.

Les phénomènes non linéaires, telles que l'absorption et la fluorescence à deux photons, la génération de seconde harmonique et la microscopie hyper-Raman sont exploités, entre autres, pour adresser ou induire des effets importants de manière très localisée, ou encore pour pallier le problème de pénétration de lumière dans des systèmes tri-dimensionnels. L'amplification des signaux via l'effet plasmonique, par l'introduction de nanoparticules métalliques, est également recherchée.

L'application « capteurs » à application environnementale (métaux, composés organiques volatils...) ou biologique (ADN, virus, sucre...) occupe une place importante. Un bon nombre d'entre eux est basé sur des fluorophores à fort rendement quantique et on voit apparaître des systèmes intégrés du type « Lab-On-Chip », notamment microfluidiques.

Aujourd'hui, la problématique se situe au-delà de la chimie des molécules photo-actives, à la limite avec d'autres domaines (chimie des surfaces, chimie analytique, mécanique des fluides, traitement du signal).

## 4.4 MODÉLISATION

Par son essence même la spectroscopie est étroitement liée à chimie quantique et la simulation. En particulier la modélisation de la dynamique moléculaire, des états électro-niquement ou vibrationnellement excités est un préalable à l'interprétation des résultats expérimentaux et peut constituer un guide pour des expériences pertinentes. La description des états excités, de leur relaxation ainsi que des surfaces de potentiel conduisant à des réactions photochimiques a fait d'énormes progrès au cours des dernières années. Des chromophores de plus en plus gros ont été étudiés avec des méthodes quantiques avancées, faisant souvent intervenir des intersections coniques, dont la présence est révélée grâce à la spectroscopie femtoseconde. De même les calculs vibrationnels de grosses entités moléculaires chirales permettent, avec l'appui d'expériences spécifiques sur l'activité optique Raman ou infrarouge, d'établir avec précision les conformations absolues de molécules biologiques ou naturelles. À côté des calculs quantiques, la description des multi-chromophores où le couplage électronique joue un rôle important, a été réalisée dans le cadre de la théorie excitonique en y introduisant des données de chimie quantique. Des efforts ont été également consacrés à l'étude des chromophores comportant des métaux de transition ainsi qu'au contrôle cohérent de réactions.

Un défi important pour l'avenir est la description des états excités et des réactions photochimiques dans des environnements inhomogènes. Tel est le cas de nombreux systèmes biologiques où la dynamique conformationnelle joue un rôle clé. Suivre l'énergie d'excitation en tenant compte des fluctuations

structurales nécessitera des synergies entre chimie quantique, dynamique quantique et dynamique moléculaire. Les différentes techniques d'imagerie ne sauraient se passer d'une modélisation poussée, tenant compte de l'interaction lumière – objet étudié. En effet les données expérimentales sont de moins en moins exploitables directement et nécessitent des traitements mathématiques sophistiqués incluant la gestion d'incertitudes et/ou l'analyse statistique.

## 4.5 TENDANCES ET RISQUES

Au cours des quatre dernières années, les travaux dans le domaine de la spectroscopie/photochimie, comme dans de nombreux autres, ont affiché de plus en plus ouvertement leur lien avec les grandes questions de société. Cette tendance, qui a généré une orientation vers des systèmes biologiques, l'environnement, la chimie verte, l'optoélectronique et l'énergie, va s'accroître, compte-tenu du mode de financement de la recherche. Une telle orientation comporte deux types de risques. En premier lieu, lorsque la spectroscopie est utilisée dans le cas de systèmes ou d'environnements complexes, la validité de concepts et des équations déduits à partir des travaux antérieurs sur des systèmes plus simples n'est pas toujours établie. Un exemple typique est l'utilisation abusive du transfert d'énergie pour déduire des données structurales (FRET). Un autre exemple, lié aux conditions expérimentales, est l'endommagement des échantillons par des impulsions laser intenses qui servent à leur étude. Dans les deux cas, les résultats obtenus peuvent être erronés. Pour faire face à de tels risques, des développements conceptuels et méthodologiques adaptés à chaque type de spectroscopie sont indispensables. Un aller-retour continu entre l'application visée et la recherche fondamentale, où les principes fondateurs sont interrogés en permanence, est incontournable. Un deuxième écueil concerne l'élaboration de systèmes photo-actifs sans réel souci de les

intégrer dans un dispositif. Le risque est de gaspiller des forces si un cahier des charges bien précis n'est pas défini. L'applicabilité de lois fondamentales devrait être questionnée en rapport avec des questions de sélectivité, de sensibilité ou d'altération des propriétés intrinsèques des molécules photo-actives dans un milieu donné.

Signalons enfin un risque grave qui pèse sur la recherche en spectroscopie/photochimie. Les enseignements spécialisés dans ces domaines disparaissent ou ont déjà disparu dans certaines universités créant ainsi un déficit de jeunes aptes à intégrer des structures de recherche. Ainsi le transfert de connaissances et de savoir-faire vers les jeunes générations tend à se tarir et c'est ainsi toute une discipline qui, à terme, risque à son tour de disparaître.

## 4.6 LABORATOIRES ET INSTRUMENTATION

De nombreuses Unités de la Section 13 affichent clairement des études spectroscopiques et/ou photochimiques parmi leurs axes principaux de recherches. À celles-ci s'ajoutent plusieurs laboratoires ne relevant pas de la Section 13 qui abordent des thématiques similaires. Notons également quelques GDR rassemblant les chercheurs qui étudient les photochromes et des applications de spectroscopie/photochimie dans des domaines allant des matériaux à la médecine.

Certains dispositifs expérimentaux développés ou hébergés dans les Unités mentionnées ci-dessus possèdent des caractéristiques uniques au niveau international. Ceux-ci sont ouverts à la communauté scientifique via des opérations de plateformes mutualisées, des appels d'offre nationaux ou internationaux.

Enfin, le synchrotron SOLEIL ouvre d'énormes possibilités d'études spectroscopiques, en particulier dans le domaine X-XUV et les spectroscopies électroniques (photoémission, Auger, Raman X haute résolution...).

Celles-ci permettront de réaliser des études cinétiques de réactions chimiques de surface (sensibilité chimique, informations sur la composition, sur la nature de la liaison chimique, le profilage en profondeur et l'ordre orientationnel des adsorbats...). En effet, avec cet instrument, la photoémission, limitée actuellement aux conditions d'ultra-vide, pourra s'attaquer aux conditions réelles de réactivité des surfaces de la chimie environnementale, de la science des biomatériaux et de la catalyse. Par ailleurs, les études en phase gaz bénéficieront des développements réalisés autour de SOLEIL. Celles-ci concernent, entre autres, la dynamique réactionnelle/nucléaire à une échelle sub-femtoseconde.

## **5 – RÉSONANCES MAGNÉTIQUES, SPECTROSCOPIE DE MASSE**

### **5.1 RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE (RPE)**

La RPE permet la détection et l'étude d'espèces à spin électronique non nul. Centrée uniquement sur les électrons « célibataires » et les interactions avec leur environnement, la RPE s'adresse en fait à un grand nombre d'objets intervenant dans les propriétés physiques et chimiques de la matière, les fonctionnalités et l'évolution des matériaux, et le fonctionnement du monde vivant. La variété de ses domaines d'applications a ainsi longtemps été occultée par la dispersion des appareillages, le manque d'interaction au sein des communautés scientifiques utilisant la RPE, et le retard de la France en termes d'équipements avancés.

Jusqu'en 2005, la France accusait un retard très important en équipements de RPE impulsioneille, d'imagerie RPE et de RPE à haut champ. La situation s'améliore peu à peu

avec l'acquisition récente ou programmée de deux spectromètres impulsioneils à 9 GHz (Strasbourg en 2009 et Marseille en 2010), d'un spectromètre impulsioneil à haut champ (CEA Saclay en 2009), de trois imageurs RPE en onde continue (2 à l'université Paris V en 2008 et Lille en 2010) et un imageur RPE impulsioneil (Lille, en 2011-2012). La dynamique engendrée par la renaissance en 2004 d'une association regroupant les utilisateurs d'appareillages de RPE (ARPE) est à l'origine du projet de TGE en instance d'évaluation : le réseau RENARD qui regroupe les laboratoires équipés (ou en voie de l'être) en spectromètres RPE avancés localisés à Lille, Strasbourg, Grenoble, Marseille et Paris, constituant le cœur de réseau. Ce projet de réseau vise pour l'essentiel à amener la France à un niveau acceptable d'équipements dont la répartition géographique ultérieure serait concertée (au niveau de l'ARPE), tenant compte des expertises présentes et à venir (essaimage).

### **5.2 LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE (RMN)**

La RMN est une technique d'analyse centrale en chimie, en biochimie et en science médicale. Elle est utilisée pour la caractérisation à l'échelle atomique ou moléculaire de catalyseurs, de polymères, de verres, de cristaux liquides, de systèmes supramoléculaires, de médicaments, de produits naturels, de membranes et de protéines, mais la plus grosse part des échantillons analysés reste les produits et intermédiaires de synthèse. Les développements technologiques et méthodologiques actuels visent à augmenter la sensibilité et la résolution (augmentation de l'intensité des champs magnétiques, recours aux cryosondes et aux basses températures, méthodes de détection alternatives, espèces hyperpolariées, états de spin à longue durée de vie, sondes solides très hautes vitesses...), à diminuer le temps d'analyse (méthodes multidimensionnelles à 1 scan, échantillonnage non uniforme) et à combiner les approches

de spectroscopie et d'imagerie. Comme autres thèmes émergents on peut citer la métabolomique, l'imagerie cellulaire, la spectroscopie *in-vivo*, et les méthodes de calculs de paramètres RMN *ab-initio*.

La communauté RMN française est très active et très visible internationalement, avec de nombreux conférenciers invités dans les congrès internationaux et une bonne représentativité dans tous les grands domaines de la RMN : méthodologie solide et solution, simulation, applications biologiques et matériaux. La RMN française est également assez bien structurée grâce à quatre réseaux (RMN grand bassin Parisien, RMN grand Est, RMN grand sud ouest, et l'axe RMN Rhône alpin), un TGE-TGIR, plusieurs fédérations de recherche, et une association le GERM (<http://www.germ.asso.fr/>) qui organise des congrès ou des écoles d'été et qui centralise un certain nombre de documents de cours sur la RMN.

Le parc de spectromètres Français est constitué d'environ 230 machines, plutôt bien reparti territorialement (avec tout de même une majorité de machines dans le grand bassin parisien et le grand sud est). Le nombre et la qualité de ces spectromètres ont été accrues récemment, en effet, le CRMN de Lyon s'est vu doté en octobre 2009 du premier spectromètre 1 GHz (23,5 Tesla) commercial, et à travers un TGIR (<http://tgermn.cnrs-orleans.fr/>), c'est toute la communauté RMN française et européenne qui a accès à une série de spectromètres haut champs (800 SB Bordeaux, 750 WB Orléans, 1000 SB et 800 SB Lyon, 800 SB Grenoble, 950 et 800 SB Gif sur Yvette, 900 SB et 800 SB Lille) équipés de sondes performantes (cryosondes pour la RMN en solution, sondes triples et très hautes vitesses pour le solide). En dehors de ce TGIR un certain nombre d'investissement ont également eu lieu récemment ou sont en cours (Jussieu, Strasbourg, Montpellier, Toulouse...). Ces investissements n'ont permis de rattraper qu'une partie du retard en équipement par rapport aux concurrents internationaux. En effet, la France même si elle possède aujourd'hui le seul spectromètre 1 GHz ne détient qu'environ 5% du parc mondial de

spectromètres à haut champ contre environ 25% pour l'Allemagne, 15% pour le Japon et 40% pour les USA. D'autre part la plus grosse partie du parc français est constituée de spectromètres « bas champs » (300-400 MHz) équipés de sondes et de consoles parfois hors d'âge qui devraient être mises à niveau. Il est à noter que l'essentiel du parc est constitué de spectromètres de marque Bruker (95%) ce qui constitue certes un avantage pour le prêt de matériel et la formation, mais également un inquiétant monopole.

Les interactions avec le monde industriel sont assez fortes, en plus de relations compréhensibles avec le groupe Bruker, on peut signaler des activités de prestation de service et des collaborations avec des PME/PMI et avec des grands groupes de nombreux secteurs. On peut également noter des relations structurées avec d'autres organismes de recherche : Universités, CEA, INSERM, CNES, institut Pasteur, INRA. On peut néanmoins regretter le peu de présence, de la RMN française au niveau des institutions européennes.

Même si l'interprétation des spectres de RMN est enseignée partout en France au niveau licence de chimie et biochimie, on peut souligner le peu d'enseignement de RMN de haut niveau en France (Cours du GERM et quelques masters 2). Le problème est d'autant plus sérieux que la recherche en RMN se situe aux interfaces et nécessite des compétences croisées (Chimie, Physique, Biologie).

En conclusion, même si les investissements récents en matière de hauts champs devraient rapidement porter leurs fruits, il convient de ne pas négliger la mise à jour des spectromètres à champs « standards », le développement de logiciel de traitement et d'aide à l'analyse et le recrutement des personnels. D'autre part, on peut aussi souligner que la montée en champs va sans doute ouvrir de nouvelles possibilités, mais va créer de nouveaux problèmes (en particulier en ce qui concerne l'électronique de radiofréquence). Il convient donc d'investir dans les méthodes d'acquisitions rapides, d'hyperpolarisation, de détection de noyaux exotiques et dans toutes techniques alternatives qui pourront prendre le relais quand l'augmentation des

champs ne sera plus techniquement ou économiquement possibles.

### 5.3 LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE

C'est un ensemble de techniques, dont l'applicabilité et les performances continuent à évoluer considérablement. Que ce soient les sources d'ions, les analyseurs ou les détecteurs (les 3 grandes composantes d'un spectromètre de masse), tous ont vécu des bouleversements importants depuis quelques années. La versatilité et la sensibilité sont les deux grandes caractéristiques de la spectrométrie de masse. Les plus faibles quantités d'analyte injectées pour être détectables en routine sont sub-femtomole aujourd'hui, et deviendront certainement sub-attomole dans les quelques années à venir. La capacité de détection de molécule unique est en passe de se généraliser. Cette sensibilité est particulièrement importante en analyse biologique et biomédicale. Quant à la versatilité, on peut considérer qu'elle est largement atteinte puisque presque tout type d'échantillon est analysable aujourd'hui. Une autre évolution majeure concerne la limitation de la préparation d'échantillon en amont de l'analyse en masse. L'enjeu est d'une part la détection de composants très minoritaires d'un mélange (rapport 1:10<sup>6</sup> ou plus, nécessité absolue pour l'analyse environnementale et biomédicale), d'autre part la détection simultanée d'un très grand nombre de composants (plusieurs milliers en pétrologie, en géochimie ou en analyse des vins). Pour l'analyse de routine, l'enjeu est considérable, industriel et public. S'il existe déjà des spectromètres de masse couplés à des techniques séparatives dans les grands aéroports et les grands hôpitaux, on peut penser que leur généralisation aura lieu dans les toutes prochaines années. Dans cette optique, le couplage avec des tech-

niques séparatives est routinier, même si l'exploitation complète du couplage avec la chromatographie bidimensionnelle gazeuse ou liquide reste à réussir. Une petite révolution parmi les techniques séparatives couplées à la spectrométrie de masse est la renaissance de la mobilité ionique, une forme de chromatographie en phase gazeuse pour les ions. Son couplage avec la spectrométrie de masse a explosé depuis deux ans et va probablement se généraliser sur le marché commercial. Une autre approche consiste à améliorer les performances de pointe en résolution et précision en masse, pour s'affranchir de toute méthode séparative. Les spectromètres utilisant la transformée de Fourier, en particulier en résonance cyclotronique des ions, offrent les caractéristiques requises avec des champs magnétiques de plus en plus intenses. Le CNRS commence à doter la communauté française d'un réseau de plates-formes à hautes performances dans ce domaine, sur un modèle proche de celui de la RMN à très haut champ.

On peut aussi mentionner l'importance du couplage de la spectrométrie de masse avec d'autres techniques physico-chimiques : RMN, UV... Ces couplages sont déjà commerciaux, ils devraient se banaliser dans les prochaines années. En effet la spectrométrie de masse n'est pas toujours capable d'apporter des informations structurales, surtout pour des molécules complexes. Ces couplages pourront apporter un arsenal de routine très important dans les laboratoires d'analyse. Dans cette perspective, les appareillages ne sont pas nécessairement les plus performants pour chacune des techniques couplées, c'est le couplage qui apporte un plus considérable. Le couplage avec la spectroscopie IR en phase gazeuse a été développé au début des années 2000 (spectroscopie d'action, à absorption de photons multiples, dite « IRMPD »). Son implémentation dans des appareils de laboratoire permettra probablement sa généralisation dans un avenir proche.



# 14

---

## CHIMIE DE COORDINATION, INTERFACES ET PROCÉDÉS

*Président de la section*

Lahcène OUAHAB

*Membres de la section*

Dorothee BERTHOMIEU

Sylvie BOURGEOIS

Jean-François CARPENTIER

Jean-Pierre COUVERCELLE

Marco DATURI

Élisabeth DJURADO

Anne DOLBECQ BASTIN

Gilles FAVIER

Anouk GALTAYRIES

Yannick GUARI

Virginie HARLÉ

Myrtil KAHN

Boris LAKARD

Franck LE BIDEAU

Yanling LI

Claude MIRODATOS

Jean-Marc PLANEIX

Rinaldo POLI

David SÉMERIL

Jacky VIGNERON

La section 14 compte 348 chercheurs rattachés à des unités qui relèvent principalement de l'institut de chimie, 11 chercheurs dépendant d'autres organismes de recherche et 426 enseignants chercheurs. Elle se structure en trois pôles principaux qui sont la chimie moléculaire (44%), la catalyse hétérogène (27%) et la science des surfaces et interfaces (29%). Notons que les pourcentages assignés ne reflètent que des tendances, du fait de l'évidente difficulté à classer de nombreux chercheurs relevant de deux voire trois de ces disciplines. Par ailleurs, les évolutions récentes de ces disciplines tendent à les rapprocher sur de nombreux sujets et approches, ce qui rend ce découpage en trois parties parfois arbitraire et générateur de certaines redondances.

La chimie moléculaire recouvre :

– les synthèses et études des propriétés physiques, biologiques ou catalytiques des complexes inorganiques et organométalliques ;

– la synthèse de matériaux moléculaires à propriétés physiques contrôlées (magnétisme, conductivité, électroluminescence, réponses optiques...);

– la polymérisation des monomères issus de la pétrochimie ou de la biomasse ;

– la chimie bioinorganique.

Les principaux domaines d'application et défis de la catalyse hétérogène sont à ce jour :

– la conversion des ressources fossiles lourdes pour les carburants et l'énergie,

– la conversion de ressources renouvelables dérivées de la biomasse

– la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau par photo et électrocatalyse.

– Les principaux domaines transverses sont i) l'optimisation de la synthèse industrielle des grands intermédiaires (acrylate de méthyle, cyclohexanol, styrène, ammoniac, oxydation ménagée des alcanes, reformulation des carburants) et de produits de la chimie fine, ii) la catalyse pour l'environnement (deNOx, deSuies et synthèse de carburants propres et renouvelables, iii) de nouveaux procédés pour la formulation et la mise en forme des catalyseurs, iv) l'étude des mécanismes et cinétiques des réactions catalytiques par leur modélisation théorique et la mise en œuvre de techniques de caractérisation résolues dans le temps et l'espace (réacteur TAP, spectroscopie operando), v) le génie catalytique pour la mise au point de nouveaux réacteurs comme les micro (nano) réacteurs structurés.

La science des surfaces et interfaces concerne enfin :

– l'électrochimie moléculaire, l'électrochimie interfaciale sur métaux et sur semi-conducteurs inorganiques ou organiques (polymères conducteurs) avec examen des événements à l'échelle atomique (impliquant adsorption, photoélectrochimie, phénomènes de croissance et de dépôt, corrosion, mise en forme de nouvelles batteries, processus électrocatalytiques, capteurs);

– la science des surfaces axée sur la compréhension de la réactivité et sur la mise en forme des sites à des facteurs d'échelle allant du nano au macro objet.

# 1 – CONJONCTURE ET PROSPECTIVE EN CHIMIE MOLÉCULAIRE

## 1.1 CATALYSE HOMOGÈNE

### Introduction

L'importance de la catalyse homogène n'est plus à démontrer tant au niveau académique qu'industriel. Dans le développement d'une chimie toujours plus performante et durable, l'élaboration de procédés catalytiques sélectifs et efficaces, permettant de répondre aux problèmes actuels en terme d'environnement, de santé et d'économie, impose une bonne connaissance et maîtrise des différents paramètres intervenant au niveau du précurseur métallique et de son environnement proche. Le contrôle de la sélectivité en catalyse est au cœur de la discipline, un procédé sélectif étant non seulement moins coûteux mais aussi moins polluant.

### Contrôle des interactions fortes et faibles autour du cycle catalytique

Si l'importance des liaisons hydrogène aussi bien en synthèse organique qu'en biologie n'est plus à démontrer et si la chimie supramoléculaire offre aussi des exemples intéressants dans ce domaine, le rôle de ces liaisons est encore très largement sous-évalué en catalyse. D'une façon générale, le rôle des interactions secondaires, ou faibles (liaisons agostiques, ligands sigma et en particulier impliquant deux atomes autre que l'hydrogène) reste largement sous-estimé. Un grand nombre de réactions impliquant des complexes des métaux de transition sont par exemple affectées par des effets de paires d'ions (effet le plus spectaculaire en polymérisation), mais des données accumulées se situent plus en terme d'observation de l'effet, qu'en terme de compréhension et de contrôle de cet effet. Seule une bonne compréhension de toutes les interactions présentes

dans la sphère de coordination d'un métal, que ce soit dans la première ou la seconde sphère de coordination, et leur exploitation judicieuse pour l'élaboration de nouveaux systèmes catalytiques permettront une activité et une sélectivité accrues.

La compréhension globale d'un cycle catalytique, qui passe par une étude pas à pas de chaque étape, reste donc plus que jamais indispensable. Il convient de manière générale d'amplifier les efforts existants en termes d'études mécanistiques impliquant soit une ou plusieurs étapes d'un cycle catalytique. Le développement des outils théoriques que l'on connaît depuis ces dernières années va maintenant permettre de calculer des cycles catalytiques complets : on peut en attendre à la fois un rôle prédictif et un complément indispensable aux données expérimentales.

Les collaborations étroites entre expérimentateurs et théoriciens sont primordiales. Certains domaines nécessitent des efforts soutenus parmi lesquels on peut citer les réactions catalysées par activation C-H, la fonctionnalisation d'alcane, la fonctionnalisation de liaisons fortes, la catalyse organométallique de surface. Les systèmes privilégiant les réactions en un seul pot, tandem ou en cascade doivent être recherchés. Les recherches sur la synthèse de nouveaux ligands polyfonctionnels, de nouveaux catalyseurs et les études mécanistiques, incluant les aspects cinétiques et thermodynamiques pour comprendre les processus élémentaires de formation et rupture de liaisons, doivent rester des préoccupations majeures.

### **La valorisation des ressources naturelles**

L'activation de petites molécules d'origine naturelle ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) ou de molécules issues des procédés de cracking (petits alcènes, alcanes) est importante d'un point de vue économique et environnemental. Des progrès ont été accomplis ces dernières années et l'on en sait un peu plus concernant les processus d'activation de ces molécules mais la situation n'est pas encore satisfaisante. L'exemple le plus frappant

est celui fourni par le diazote qui est une ressource naturelle très abondante. On sait le convertir en ammoniac par une voie hétérogène (procédé Haber Bosch) mais il est encore inconcevable, vu l'état des connaissances actuelles, de l'utiliser dans des transformations catalytiques pour préparer des dérivés d'usages courants (amines, amides, hydrazines, hétérocycles...). Il en est de même pour d'autres molécules comme le méthane et les petits alcanes bien que des progrès récents très significatifs aient été récemment effectués dans l'étude des réactions de métathèse. La fonctionnalisation des petites oléfines peut également être considérée comme faisant partie des priorités. Les procédés de cracking fournissent en effet un grand nombre de ces dérivés que l'on ne sait pas encore fonctionnaliser à volonté. Leur transformation en oléfines plus lourdes par des réactions d'oligomérisations contrôlées reste un défi important pour la préparation de synthons de base pour la chimie fine. Bien que des progrès significatifs aient été effectués ces dernières années sur les processus de polymérisation, la maîtrise des procédés de co-polymérisation n'est pas encore acquise.

### **Polymères biosourcés et/ou (bio)dégradables**

Le développement sans précédent des matières plastiques qui ont investies notre vie quotidienne dans des domaines divers (emballage, bâtiment, transports, loisirs...) peut s'expliquer par les qualités multiples de ces matériaux (hydrophobicité, inertie biologique, faible densité, forte résistance mécanique...) et leurs faibles coûts de fabrication. Leur exploitation intensive pour des usages courants a cependant conduit à des problèmes de pollution importants compte tenu de leurs durées de vie élevées et des difficultés posées par leur recyclage : leur combustion pour produire de l'énergie nécessite de retraiter les fumées résultantes tandis que leur réutilisation entraîne des efforts de tri et de nettoyage.

Dans ce contexte, la synthèse de polymères (bio)dégradables issus de la biomasse

(non alimentaire comme le bois et les résidus forestiers ou alimentaire comme le maïs ou le blé) apparaît comme une alternative intéressante pour minimiser les quantités de matières plastiques issues de la pétrochimie. Ceux-ci font en effet partie du cycle naturel du carbone et sont recyclables par compostage ou combustion.

Les chercheurs de la section 14 dans ce domaine interviennent au niveau de la conception, de la synthèse d'initiateurs organométalliques ou inorganiques et de leur application dans l'obtention de polymères biodégradables comme par exemple les acides poly-lactiques ou glycoliques. Les modifications de ces complexes sont faites en fonction des propriétés souhaitées (tacticité, polydispersité, masses moléculaires...) et en interaction avec les chercheurs de la section 11.

## 1.2 MÉTAUX EN BIOLOGIE OU CHIMIE BIOINORGANIQUE

### Introduction

Les ions métalliques, bien que peu abondants dans les systèmes biologiques, sont essentiels pour le développement de la vie animale ou végétale. Un tiers des protéines sont des metallo-protéines et de nombreuses réactions cruciales pour la vie sont catalysées par des metallo-enzymes. Par exemple, les sites actifs métalliques catalysent des réactions aussi fondamentales que la conversion du dioxygène en eau ou l'inverse, du diazote en ammoniac ou encore du méthane en méthanol. Un paradoxe de la metallo-biochimie provient du fait que les ions métalliques sont essentiels à de très nombreux processus biologiques tout en étant très toxiques à certaines concentrations. La nature résout ce paradoxe en faisant appel à d'autres metallo-protéines chargées de transporter, réguler et stocker ces ions métalliques afin de maintenir une concentration intracellulaire appropriée. Les metallo-enzymes, la conception de systèmes biomimétiques, la metallo-régulation et les relations entre metallo-protéines et

maladies sont des domaines clés de la chimie bioinorganique. Celle-ci s'est développée de façon spectaculaire ces vingt dernières années notamment grâce au développement de méthodes spectroscopiques sophistiquées telles que le Mössbauer, la RPE, la RMN, la Raman, l'IR, la spectrométrie de masse mais aussi l'électrochimie et les calculs théoriques. Ainsi la compréhension des mécanismes réactionnels progresse grâce aux études structurales, spectroscopiques et cinétiques des enzymes et à l'élaboration, la caractérisation et l'étude de la réactivité de complexes modèles dans un environnement pluridisciplinaire.

### Photosynthèse

L'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique grâce à deux photosystèmes (photosystème II et photosystème I). L'oxydation de l'eau en dioxygène par le photosystème II se produit au niveau d'un complexe de quatre Mn et d'un calcium. Cette réaction est une source d'électrons pour la réduction d'un pool de quinones réoxydées par le cytochrome b6f permettant la formation d'un gradient de protons transmembranaires et la réduction d'une protéine à cuivre, la plastocyanine, donneur d'électron du photosystème I. Les photosystèmes II, I et le cytochrome b6f sont tous de gigantesques complexes protéiques membranaires où se produisent des réactions de transfert d'électrons et de protons. Leurs structures cristallines sont connues depuis peu. Elles ont, en particulier, dévoilé un arrangement sans précédent du complexe Mn<sub>4</sub>-Ca. Les études sur les relations structure-activité de ce centre représentent un enjeu important.

La chaîne respiratoire mitochondriale implique elle aussi un ensemble de complexes protéiques permettant le transfert des électrons provenant d'équivalents réducteurs NADH ou FADH<sub>2</sub> jusqu'au site de réduction de O<sub>2</sub>. Une première structure cristallographique de la cytochrome c-oxydase a révélé, au site actif, un système bimétallique hème/cuivre, mais ce n'est que récemment qu'il a été montré qu'un radical tyrosinyl voisin du site à cuivre

participait à la réduction à quatre électrons de l'oxygène. Ces études sont fondamentales pour la santé puisque l'on sait que c'est au niveau des complexes de la chaîne respiratoire que sont produits des radicaux libres dérivés des espèces du dioxygène tels que  $O_2^-$ . Réduire par voie catalytique chimique le dioxygène à quatre électrons et non en eau oxygénée comme le font les réducteurs classiques est un vrai défi.

## Hydrogénases

La première structure d'hydrogénase a été obtenue en France il y a quelques années. D'autres ont suivi et l'ensemble de ces découvertes a mis en évidence des clusters fer/soufre ou fer/nickel uniques et insoupçonnés jusqu'alors puisque présentant des ligands CN et CO. Un nouveau domaine a ainsi été ouvert pour les chimistes de coordination devant la nécessité d'élaborer des complexes modèles pour interpréter les données biologiques. L'enjeu économique avec l'élaboration de piles à combustible est considérable.

## Mono oxygénases

Les cytochromes P-450 constituent aujourd'hui un cas d'école démontrant que l'association de l'approche chimique avec les systèmes modèles porphyriniques et les études biochimiques ont permis de mettre à jour le cycle catalytique de ces mono-oxygénases. Des études en cryo-cristallographie ont permis de caractériser des intermédiaires réactifs proposés par les chimistes des années auparavant. Les retombées concernent tant la santé (compréhension des accidents médicamenteux) que la catalyse d'oxydation avec l'élaboration de systèmes bio-inspirés.

Pour des raisons économiques évidentes, les méthanes mono-oxygénases (mmo) sont des systèmes importants. Si beaucoup de choses sont connues pour la mmo à fer, ce n'est que très récemment que le mystère a commencé à être dévoilé pour son analogue à cuivre. L'énigme reste cependant entière pour cette der-

nière et de nombreuses équipes dans le monde investissent tant sur les études de l'enzyme que sur l'élaboration de systèmes modèles.

Une autre avancée récente a été réalisée avec la caractérisation des mono-oxygénases à cuivre dopamine  $\beta$ -hydroxylase et PHM. Celles-ci sont impliquées dans le système nerveux et sont des cibles potentielles pour des médicaments. L'étude de ces deux enzymes associés aux systèmes modèles constitue un des exemples les plus remarquables de synergie ayant permis la caractérisation récente d'intermédiaires réactifs. Aujourd'hui, l'étude de ces mono-oxygénases non-hémiques constitue un défi majeur pour :

- comprendre les mécanismes réactionnels aujourd'hui inconnus ;
- élaborer des catalyseurs biomimétiques performants.

## Les enzymes de protection cellulaire

Le dérèglement fonctionnel d'enzymes SOD est à l'origine de maladies rare graves telle que la maladie de Lou Gehrig. Ces enzymes, catalysant la dismutation de l'anion superoxyde (par exemple au niveau de la chaîne respiratoire), présentent soit un ion Fe, Mn ou Cu selon leur localisation. Leur étude est non seulement clé pour comprendre l'origine de ces maladies mais aussi pour l'élaboration de petits complexes métalliques performants qui pourraient être pris comme médicaments contre le vieillissement cellulaire.

## Les enzymes hydrolytiques

Elles interviennent à tous les niveaux de fonctionnement des systèmes biologiques que ce soit pour l'hydrolyse d'une liaison peptidique ou l'hydrolyse d'un pont phosphodiester. Dans les deux cas, le défi chimique est important. Développer un système chimique efficace pour hydrolyser dans des conditions douces et contrôlées une fonction amide ou phosphodiester aurait des applications considérables. Enfin, les problèmes liés à l'homéo-

stasie, au stockage et à l'interaction avec des protéines sont des points majeurs. À titre d'exemple, la maladie d'Alzheimer et celle du prion, sont toutes deux liées à l'interaction entre protéines et ions Cu et/ou Zn. Dans ce domaine, clairement situé à l'interface de plusieurs disciplines, plusieurs aspects relèvent plus particulièrement de la section 14. On peut citer les études spectroscopiques sophistiquées (Mössbauer, RPE, ENDOR...) appliquées aux protéines elles-mêmes ou aux systèmes modèles et la synthèse et l'étude de petits composés modèles pour :

- caractériser des espèces réactives ;
- en déterminer les propriétés en terme de réactivité ;
- évaluer les effets de confinement au site actif et les effets de seconde sphère de coordination qui semblent jouer un rôle clé.

## Les CORM

Au début des années 2000, un nouveau champ d'application médicale (CORM pour CO releasing molecules) est apparu. Il a pour ambition de concevoir des molécules susceptibles de délivrer du monoxyde de carbone en très faibles quantités et de façon spécifique dans l'organisme. En effet, en dépit de son caractère hautement toxique bien connu, le monoxyde de carbone s'est révélé être le produit de la dégradation de l'hème, en quantités infinitésimales ( $1-6 \text{ mmol kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) chez les mammifères. Suite à cette découverte il y a une cinquantaine d'années, il a été montré plus récemment qu'il pouvait, en plus d'être un puissant vasodilatateur, avoir entre autre des effets anti-inflammatoires, anti-apoptotiques et anti-prolifératifs. La recherche de complexes carbonylés susceptibles de relarguer du monoxyde de carbone de façon contrôlée devient donc un défi pour les années à venir.

## Les sondes multimodales

L'association d'un marqueur émetteur d'un signal et d'un bioligand peut conduire à

une espèce susceptible de se lier de façon spécifique à une cible d'intérêt biologique. Si c'est le cas, la molécule ainsi engendrée pourra être utilisée dans le domaine de l'imagerie médicale. Plusieurs techniques non invasives sont ainsi apparues comme la tomographie (scanner), l'imagerie par résonance magnétique (IRM), la scintigraphie monophotonique (SPETC), la tomographie par émission de positons ou encore l'imagerie par fluorescence. Cependant, aucune de ces techniques n'est parfaite et ne peut conduire à un diagnostic complet. Par exemple, l'IRM et la tomographie produisent des images à résolution spatiale élevées mais sont limitées par leur faible sensibilité tandis que les techniques d'imagerie nucléaire (TEP/SPECT) sont très sensibles mais conduisent à une faible résolution spatiale. Une approche multimodale, correspondant au co-enregistrement par plusieurs types d'imageries complémentaires a donc été mise au point pour combiner les avantages de chaque technique.

L'utilisation simultanée de deux agents de contraste complémentaires peut être une première solution. Elle est cependant limitée par l'effet additif des toxicités des deux espèces utilisées ainsi que par leurs différences pharmacocinétiques.

La seconde solution, plus ambitieuse, consiste à associer plusieurs marqueurs correspondants à des techniques différentes sur un même vecteur.

Cette thématique concerne plus particulièrement les chercheurs de la section 14 spécialistes de la chimie de coordination du Gd(III) (IRM), du  $^{64}\text{Cu}$  ou du  $^{68}\text{Ga}$  (TEP), du  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ou du  $^{111}\text{In}$  (SPECT) ou encore de la chimie des lanthanides (III) (imagerie optique par fluorescence).

## 1.3 MATÉRIAUX MOLÉCULAIRES

### Introduction

Les matériaux moléculaires sont obtenus à partir de molécules (complexes de coordina-

tions, clusters polymétalliques, ligands électroactifs, etc.) jouant le rôle de briques élémentaires. La nature des composés et leur assemblage peuvent conduire à des matériaux aux propriétés diverses, allant vers des applications nombreuses.

### **Matériaux (multi)fonctionnels : Magnétisme, conductivité, bistabilité**

La compétence principale de la section 14 dans ce domaine se situe indéniablement en synthèse des briques initiales permettant l'élaboration de systèmes (multi)fonctionnels plus complexes. Dans ce contexte, le savoir-faire en synthèse en France a permis de posséder une importante base de données dans laquelle il est maintenant possible de puiser des molécules aux propriétés intéressantes allant des composés hybrides possédant des propriétés chromogènes (photo- ou électrochrome) aux molécules aimants. Les études fondamentales lient synthèse, caractérisation par des grands instruments (synchrotron), étude des topologies des surfaces de films obtenus par des microscopes à champs proches (AFM, STM) et compréhension des paramètres de commutation ou de coopérativité entre molécules (magnétisme, conduction) par l'utilisation du calcul et de la modélisation (DFT). Ces nombreuses recherches fondamentales assurent à la France une très bonne position au niveau européen.

Les différentes briques moléculaires peuvent aussi posséder différents états stables, le passage d'un état A(0) vers un état B(+1) étant obtenu par un stimulus extérieur (température, lumière, courant, pression, etc.). La commutation de ces molécules leur confère un caractère binaire (0/+1) dont les applications dans le domaine du stockage de données, des capteurs, des affichages ou de l'électronique moléculaire sont évidentes.

Par exemple, dans le domaine des capteurs, il est possible de créer des dépôts de complexes porphyriniques du lutétium sur des surfaces conductrices (ITO) et d'enregistrer des variations de potentiel lors de l'interaction

de petites molécules gazeuses, même à très faible concentration, avec les complexes déposés. Ainsi, des capteurs d'ozone à usage multiple ont été récemment créés.

D'autres applications ont vu le jour notamment grâce à des molécules aux propriétés magnétiques dont la température de Curie est propice à des applications dans des conditions douces (conditions ambiantes). Ces applications ont été rendues possibles grâce à des collaborations entre chimistes et physiciens.

Les interactions fortes avec les autres sections du comité national (10, 11, 13 ou 15) – dont les savoir-faire concernent l'élaboration et la caractérisation de films, la mise en forme de couches minces ou l'élaboration de dispositifs – ont permis de passer de la molécule au dispositif ou au matériau fonctionnel. Ces interactions sont nécessaires et vitales pour relever les défis de la nanotechnologie. Une meilleure synergie entre les différents spécialistes du domaine permettra de positionner la France favorablement dans la concurrence internationale et conforter sa place européenne.

### **Matériaux moléculaires pour l'optique**

La photonique moléculaire, qui a pour objet la conception et l'élaboration de molécules et matériaux à finalités optiques, connaît actuellement un grand essor. Les développements dans ce domaine passent par une recherche en amont qui impliquent à la fois des chimistes et des physiciens. Les propriétés visées recouvrent une classe très large de phénomènes optiques ou optoélectroniques tels que les effets non linéaires pour des applications dans les télécommunications, et la luminescence à un ou deux photons pour les diodes électroluminescentes ou l'imagerie. Dans ce contexte, la chimie de coordination et la chimie organométallique jouent un rôle de plus en plus important, et l'utilisation de complexes de métaux comme précurseurs de matériaux moléculaires pour l'optique s'est accrue considérablement ces dernières années. On peut citer par exemple :

– le développement de nouveaux chromophores phosphorescents à base de complexes de métaux de la troisième ligne (Platine, Iridium...), et leurs utilisations soit comme dopants très efficaces dans des diodes électroluminescentes (OLED), soit comme sondes moléculaires luminescentes pour la détection d'ions (cations, anions), de molécules organiques ou de biomolécules.

– l'élaboration de nouvelles classes d'objets moléculaires et supramoléculaires à base de métaux de transition et de lanthanides comme chromophores pour l'optique non linéaire (quadratique ou cubique) avec des applications potentielles dans la limitation optique et l'imagerie multiphotonique.

– l'utilisation de complexes de coordination comme photosensibilisateurs dans des cellules photovoltaïques à colorant, et la conception d'architectures supramoléculaires pour le transfert d'électron et d'énergie photo-induits en vue de la photosynthèse artificielle,

– le développement de systèmes multifonctionnels, c'est-à-dire la mise en œuvre sur le même substrat moléculaire ou supramoléculaire d'au moins deux propriétés physiques (optique, magnétique...). Ce domaine est en plein essor actuellement, et la chimie de coordination est appelée à jouer un rôle prépondérant en raison de la richesse de propriétés redox, optiques et magnétiques des complexes de métaux.

## **Électronique moléculaire et systèmes multifonctionnels**

La miniaturisation continue des composants électroniques conduira inéluctablement à des composants à l'échelle moléculaire (loi de Moore). En plus de cet avantage, les systèmes moléculaires grâce à leur flexibilité de synthèse peuvent présenter deux voire plusieurs fonctionnalités (multifonctionnels) pouvant permettre ainsi de réaliser des systèmes hautement condensés dans des espaces très petits. L'électronique moléculaire jouera donc très probablement un rôle clé dans l'avenir. Dès à présent, son apparition comme un domaine scientifique nouveau, constitue un fait majeur

des dernières années. Les premières retombées sociétales sont mêmes déjà perceptibles. Ainsi, par exemple, l'électroluminescence organique débouche sur les premiers afficheurs mono, bi-chromes, voire polychromes.

L'électronique moléculaire qui est encore dans son enfance, se développe rapidement à l'interface de la physique, de la chimie et des sciences des matériaux. En chimie, les recherches se sont principalement orientées selon deux axes indépendants :

– à partir de molécules organiques hautement conjuguées pour obtenir des conductivités élevées. Les chaînes alcanes sont importantes pour la compréhension des transports de charge et effet tunnel. En outre, l'ADN vu comme un fil moléculaire naturel suscite un grand nombre d'études.

– parallèlement, des matériaux polymères inorganiques à base de  $\text{Li}_2\text{Mo}_6\text{Se}_6$  ou de  $\text{Mo}_6\text{S}_{9-x}\text{I}_x$ , par exemple, ont suscité un intérêt important. En outre, des matériaux à base de graphite et de nanotube de carbone sont également l'objet de travaux nombreux.

La chimie de coordination et la chimie organométallique constituent des outils puissants pour la construction de circuits moléculaires qui requièrent l'assemblage de multiples composants moléculaires fonctionnels dont certains doivent être paramagnétiques pour permettre la conduction électronique par effet Kondo. En effet, les clusters polycarbonés associés à des fragments métalliques constituent des objets moléculaires aux propriétés originales et prometteuses qui résultent des interactions entre les orbitales d des fragments métalliques transmises à travers des systèmes carbonés  $\pi$ -insaturés. Des méthodes de synthèse par auto-assemblage sont en cours de développement pour simplifier la préparation de ces molécules complexes.

Parallèlement aux efforts de synthèse et d'analyse des propriétés physico-chimiques, des efforts importants sont orientés vers l'étude des interactions molécules-surface et molécule-molécule sur une surface conductrice ou isolante. Ces recherches se situent à l'interface des domaines de compétences de nombreuses

unités de la section 14 et sont l'objet de collaborations internationales.

Au delà de l'électronique moléculaire, l'aspect fonctionnel à l'origine de l'intérêt pour ces nouveaux composés, concerne des domaines d'application de plus en plus variés comme l'optique non linéaire, la détection et le stockage de gaz, les composites conducteurs, etc.

## Matériaux poreux

Lorsque les briques sont liées entre elles par l'intermédiaire de ligands pontants ou de liaisons hydrogènes, les assemblages en trois dimensions obtenus conduisent à des matériaux poreux. Ces espaces créés ont la capacité de stocker des molécules de petite taille. Les différentes stratégies de synthèse de matériaux poreux sont éprouvées et des résultats fondamentaux spectaculaires ont pu être obtenus. Récemment, des cristaux provenant de l'association supramoléculaire de polyoxoanions et polyoxocations pouvant stocker des molécules et les relarguer ont été décrits et cette « respiration » est intéressante en ce qui concerne le stockage. Le domaine des matériaux moléculaires est en pleine expansion car le stockage à l'échelle moléculaire permet d'envisager une grande quantité d'applications dans des domaines porteurs allant de la miniaturisation de systèmes embarqués, notamment en ce qui concerne les piles à combustibles (stockage de l'hydrogène), à des microréacteurs chimiques.

## 2 – CONJONCTURE ET PROSPECTIVE EN CATALYSE ET PROCÉDÉS CATALYTIQUES

### 2.1 LA CATALYSE DANS LA SOCIÉTÉ

L'impact économique de la catalyse peut s'évaluer directement en termes quantitatifs et

de marché. Différents rapports commerciaux actuels évaluent le marché mondial des catalyseurs à 9,1 milliard d'€ en 2007 pour tendre vers une demande de 12,2 milliard d'€ en 2012, avec une croissance annuelle de 6,0%, la part européenne étant d'environ 23% (soit 2,8 milliard d'€). Or, l'impact de la catalyse sur l'activité économique de l'EU est évalué à plus de 100 milliard d'€, ce qui montre que la valeur générée par les utilisateurs de catalyseurs est très largement supérieure à celle créée par les fabricants de catalyseurs (rapport de 30).

Bien que la chimie européenne soit en constante décroissance depuis plusieurs décennies, la catalyse contribue à maintenir son leadership mondial, car elle intervient dans plus de 95% des volumes produits et 70% des procédés de production. À côté du raffinage, de la pétrochimie et de la chimie de spécialité, les procédés et technologies catalytiques sont impliqués dans la quasi totalité des secteurs industriels : énergie, dépollution, pharmacie, papier, agroalimentaire, automobile, matériaux de base et avancés, nanotechnologies, etc.

De plus, la catalyse est historiquement, mais plus encore aujourd'hui, au cœur de la plupart des technologies au service d'un développement durable pour la mise en œuvre de procédés chimiques à faible impact sur l'environnement (procédés hautement sélectifs, économie d'atomes et d'énergie, chimie verte, utilisation de matières premières renouvelables, etc.). Citons à titre d'exemple la catalyse de dépollution (gaz d'échappements automobiles, effluents gazeux et liquides d'usines, pluies acides, brouillards photochimiques, gaz à effet de serre, destruction de la couche d'ozone, qualité de l'air en milieu confiné, etc.) et la catalyse pour l'énergie (essences reformulées, biocarburants de nouvelle génération, production d'hydrogène pour piles à combustible, systèmes photocatalytiques). Enfin, la catalyse, fortement concernée par l'intensification des procédés ambitionne également de rendre les grands procédés de la chimie contemporaine moins toxiques (nouvelles voies de synthèse), plus compacts et plus surs.

## 2.2 LA CATALYSE EN FRANCE. FORCES, FAIBLESSES ET ÉVOLUTIONS

La catalyse, en tant que discipline scientifique, se trouve dans la situation paradoxale d'induire un extraordinaire impact au plan économique et environnemental dans les nombreux domaines évoqués tout en subissant une forte dispersion de ses forces dans plusieurs champs thématiques. Il en découle nécessairement une visibilité perfectible. Cette analyse n'est pas propre à la France, mais est partagée par l'ensemble des sociétés de catalyse mondiales.

La place de la R&D en catalyse en termes d'investissement humain (et financier) est difficile à quantifier. Pour l'Europe on estime le nombre de chercheurs actifs en catalyse à 10 000 environ. Un chiffre voisin de 1 500 peut être avancé pour la France. La Division Catalyse de la Société Chimique de France (SCF, <http://www.societechimiquedefrance.fr/fr/catalyse.html>) recense près de 40 équipes ou laboratoires académiques et industriels revendiquant toute ou partie de leur activité dans le domaine de la catalyse.

L'évaluation du rang de la catalyse française sur la base des publications scientifiques au cours des 10 dernières années (et de leur taux de citation) et de la contribution de ses chercheurs aux congrès internationaux situe la France au 4/5<sup>e</sup> rang mondial, après les USA, la Chine et le Japon et à un niveau voisin de celui de l'Allemagne. D'autres indicateurs favorables sont la participation de représentants français à la plupart des instances internationales, souvent créés à leur initiative (EFCATS, EUROPA-CAT), et à l'origine de larges programmes intégrés et réseaux d'excellence européens dans le cadre des 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> PCRD (par exemple ACENET, IDECAT, COMBICAT, TOPCOMBI, BIOCOP, EUROBIOREF, etc.).

Il s'agit donc d'une discipline forte, multidisciplinaire et dynamique, interagissant fortement avec le milieu socio-économique. Cette position favorable a longtemps été, et demeure

encore dans certains secteurs, estompée par un découpage historique en catalyse hétérogène, homogène, enzymatique et génie catalytique, peu favorable à la présentation d'un bilan visible et, surtout, peu représentative d'une évolution rapide et souvent fusionnelle des domaines d'intervention. Ainsi les laboratoires et équipes de catalyse français couvrent des champs disciplinaires très divers incluant, par exemple, la modélisation et le calcul *ab initio*, les études de génie des réacteurs, la chimie moléculaire, les études de surface, la synthèse des matériaux, le développement des spectroscopies *operando*, les études combinatoires, etc. Par ailleurs, l'émergence d'approches interdisciplinaires comme la synthèse de nouveaux matériaux multifonctionnels de type hybrides structurés, micro-mésoporeux, conçus pour l'intégration de plusieurs fonctions catalytiques et séparatives tend à rendre obsolètes les frontières rigides des anciennes disciplines de la « catalyse ».

Cette dispersion des compétences a affecté pendant longtemps la visibilité des enseignements de catalyse. Aujourd'hui, généralement enseignée au niveau LMD (à Lyon, Rennes, Poitiers, Lille, Paris, Montpellier, Toulouse, Strasbourg, Caen), dans les mastères 1 & 2 des écoles doctorales et dans les Écoles d'Ingénieurs, la catalyse apparaît plus clairement comme discipline à part entière.

Outre les enseignements nationaux en catalyse et procédés catalytiques, des programmes européens de formation et d'éducation en catalyse au niveau D ont aussi été mis en place dans le cadre de réseaux européens comme ACENET.

Les actions d'intégration entreprises au cours des dernières années à de nombreux niveaux (sociétés savantes, instances, réseaux, programmes, initiatives individuelles, vulgarisation adaptée comme réalisée par la SCF-Division Catalyse) renforcées par l'émergence de disciplines fusionnelles, ont permis une évolution sensible du paysage de la catalyse française, qui désormais présente une image plus globale de sa discipline. La tenue régulière de larges congrès internationaux en France comme le 13<sup>e</sup> Congrès International de Cata-

lyse à Paris en juillet 2004, puis plus récemment les Congrès internationaux sur la catalyse d'oxydation à Lille en 2009 (WCOC) ou sur la valorisation du gaz naturel à Lyon en 2010 (NGCS9) mobilisent une très large part de la catalyse française. Pluridisciplinaires, ces congrès donnent une image forte de la communauté et contribuent à cimenter sa cohésion.

Dans ce rapport, qui reprend la structure du précédent rapport de conjoncture de la section 14, les principaux défis auxquels la catalyse sera confrontée dans les années à venir sont recensés et quelques aspects transverses et champs thématiques touchant à des problématiques plus générales sont évoqués. Dans toute cette analyse plusieurs axes récurrents seront identifiés : énergie, gestion des ressources (économie, ressources alternatives et renouvelables, nouveaux vecteurs et intensification des procédés) et éco-conception de nouveaux procédés (économie d'atome, sélectivité, dépollution, traitement des effluents, sécurité, toxicité, analyse des cycle de vie, etc.). Le développement rapide des nanosciences, l'approche multifonctionnelle avec l'intégration des procédés (de type « one pot ») et les ouvertures vers un catalyse « douce » bioinspirée, ainsi que les urgences liées à la diminution des ressources pétrolières, contribuent fortement à ouvrir de nouveaux champs d'intervention à ce jour et pour les prochaines décennies.

## 2.3 PERSPECTIVES THÉMATIQUES ENVISAGEABLES POUR LA DÉCENNIE À VENIR

### Énergie

Dans un monde où la croissance de demande énergétique est forte et où les ressources en matières premières fossiles sont limitées, il convient d'optimiser les ressources fossiles existantes, de préparer l'avènement de nouvelles ressources renouvelables et de diminuer les rejets, en particulier les émissions des

gaz à effets de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, chlorofluorocarbures, etc.).

### **Des ressources fossiles aux agro-ressources : de nouveaux défis pour les vieilles chimies de synthèse**

Le défi énergétique et environnemental impose de mettre en œuvre de nouvelles stratégies, basées sur l'utilisation optimale des ressources traditionnelles et l'introduction de nouvelles ressources abondantes et renouvelables :

- La conversion des fractions lourdes du pétrole et des schistes bitumineux, les hydrotraitements profonds économes en hydrogène sont à poursuivre avec la contrainte permanente et évolutive des régulations sur les traces de polluants (résidus soufrés, nitrés, aromatiques, suies en quantité et en taille) ;

- La valorisation du gaz naturel, en particulier du gaz de champ, doit s'orienter vers le développement de procédés de conversion sur site isolé ou off-shore, qui implique la miniaturisation des unités de reformage (voir intensification et miniaturisation des procédés). À la valorisation du gaz naturel, il est à prévoir l'exploitation de nouvelles ressources gazières comme le bio-gaz de fermentation, déjà testée au niveau de nombreux pilotes en France et en Europe (appels ANR spécifiques en cours). En réaction inverse, la méthanation de résidus de gaz de synthèse ( $\text{CO-H}_2$ ) en vue d'une réutilisation comme combustible domestique remet au goût du jour cette vieille chimie mais avec des impératifs nouveaux comme la gestion des impuretés (soufrées, organiques et inorganiques) et la variabilité des compositions. La voie principale de valorisation du gaz naturel ou de fermentation reste la fabrication de **carburants de synthèse** exempts de soufre et d'aromatiques via le méthanol, les oléfines et leur oligomérisation, ou via le procédé Fischer-Tropsch combiné au reformage des cires en coupes naphta ou diesel. À nouveau, les spécificités des nouvelles ressources de gaz de synthèse à traiter renouvellent l'inté-

rêt et les défis scientifiques pour cette chimie de synthèse. De plus, l'intégration et la compaction des procédés imposent la découverte de catalyseurs multifonctionnels adaptés à la sévérité du cahier des charges pour l'ingénierie des réacteurs.

– Le développement des **agro-carburants et biocombustibles** à partir de la biomasse devient un enjeu sociétal et médiatique de première importance. Les développements rapides liés aux carburants dits de première génération (éthanol, bio-diesel ou FAME) ont ouvert de larges débats contradictoires sur les risques d'utiliser la biomasse dite alimentaire à des fins de carburants. D'où l'engouement pour la recherche de combustibles dits de deuxième ou nième génération, issus de la bio-masse non alimentaire, comme le bois, les résidus forestiers ou les algues, voire des microorganismes spécifiquement sélectionnés. Les voies majeures comme la gazéification thermo-catalytique (en gaz de synthèse ou méthane de synthèse) et la pyrolyse en bio-huiles traitables comme des distillats du pétrole (par hydrotraitement HDT, hydrodeoxygénation HDO, craquage catalytique FCC etc.) ouvrent aussi de nouvelles perspectives. Il s'agit de mettre au point des catalyseurs capables de supporter les conditions très sévères de ces procédés avec des mélanges de compositions très variables et souvent fortement toxiques pour les phases actives des catalyseurs métalliques ou acido-basiques conventionnels tels que les zéolithes.

Il est aussi à souligner que les carburants issus de ces ressources (très riches en composés oxygénés) vont engendrer de nouveaux défis pour la catalyse de post-traitement, avec la nécessité d'éliminer des fortes concentrations d'aldéhydes, cétones, alcools... nuisibles pour la santé, sans engendrer de surconsommation d'énergie ou d'émission de produits toxiques.

### **L'hydrogène comme vecteur d'énergie : quel rôle de la catalyse ?**

La catalyse se trouve directement impliquée dans la perspective de l'hydrogène comme vecteur d'énergie pour sa production,

sa purification et sa conversion électrochimique dans les piles à combustibles à conduction protonique (PEMFC).

L'hydrogène est produit principalement dans les grandes unités industrielles de **vapo-reformage** de gaz naturel (85%) ou d'hydrocarbures plus lourds (15%). Comme évoqué précédemment, la recherche doit s'attacher à la transition vers des ressources renouvelables de type biomasse ligno-cellulosique. Par ailleurs, la production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures déjà bien distribués (ex : diesel, kérosène) nécessite encore des progrès pour des catalyseurs de reformage peu coûteux, résistants aux poisons soufrés, aux dépôts de coke et compatibles avec des réacteurs structurés, miniaturisés et sûrs.

En ce qui concerne **les piles à combustible (PAC)**, les piles stationnaires, de puissance sont annoncées comme proches de la commercialisation depuis maintenant une bonne décennie. Par contre pour les applications embarquées (véhicules automobiles), le développement de piles miniaturisées se heurte à i) la stagnation de performances des empilements de la pile (les polymères des piles à basse température restent peu résistants aux cyclages et à la température) et ii) à la quantité prohibitive de métaux nobles requis pour les électrodes. Pour cette dernière, le développement de nouveaux catalyseurs de cathode et d'anode dans les PAC, exempt de métaux nobles, reste un vrai défi pour la décennie à venir. En ce qui concerne la purification de l'hydrogène en amont de la pile (élimination du CO, toxique pour les électrodes), peu de recherches restent requises, après la mise au point de catalyseurs très performants (par exemple à base d'or sur cérine dopée).

Le développement de bio-piles offrant des rendements électriques comparables à ceux des PEMFC, et celui de piles à oxydes mixtes stables fonctionnant à haute température (SOFC) restent des défis à résoudre sous l'angle de la catalyse et électro-catalyse pour la décennie à venir.

L'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température pour la production industrielle

d'hydrogène servant à l'alimentation de piles à combustibles sans rejet de gaz à effet de serre reste une voie prometteuse, mais les grands défis et les verrous technologiques déjà identifiés depuis plusieurs années restent d'actualité.

De la même manière, la dissociation de l'eau par photocatalyse en lumière visible pour la production d'hydrogène renouvelable reste un défi pour extrapoler la faisabilité déjà démontrée à l'échelle laboratoire (avec une cellule électrophotocatalytique avec une anode au  $\text{TiO}_2$  et une cathode au Pt irradiée sous UV) vers une production industrielle sous lumière visible. Cet objectif implique la découverte de matériaux présentant des potentiels de bande adaptés à la décomposition de l'eau, une énergie de «band gap» inférieure à 3 eV et qui soient stables sous conditions photocatalytiques.

D'autres réactions photocatalytiques, typiquement orientées vers la valorisation des agro-ressources et l'activation du gaz carbonique, présentent aussi un fort intérêt, mais leur développement à l'échelle industrielle est loin d'être acquis.

La production d' $\text{H}_2$  par dissociation d'eau sur des oxydes réductibles est une voie alternative intéressante, l'enjeu restant est de définir des matériaux capables de se réduire dans des conditions douces.

De même, d'autres formes d'activation non thermique des milieux réactionnels comme les plasmas froids ou l'assistance voltaïque ont été largement explorées mais devront évoluer vers des rendements compétitifs pour concurrencer les procédés plus conventionnels.

### **Dépollution automobile : la sévérité des normes comme moteur de la recherche**

Même si de grands espoirs sont basés sur les véhicules électriques pour l'avenir, les moteurs thermiques resteront majoritaires pour la décennie à venir et dépolluer leurs lignes d'échappement reste un défi scienti-

fique et technologique. La réponse aux normes Euro 6 (2014) et Euro 7 (2019), régulant les émissions de rejets, devra se faire de façon économe en carburant, en émission de  $\text{CO}_2$  et en coût (teneur en métaux précieux limitée).

En ce qui concerne le moteur thermique, les préoccupations vont vers la recherche d'une combustion plus propre, une amélioration des rendements pour réduire la consommation de carburant. Des architectures moteur innovantes (type combustion homogène), sont prometteuses pour certains points de fonctionnement du moteur mais engendrent de nouveaux défis liés aux types et concentrations des rejets. Une optimisation de la combustion passe également par des choix stratégiques sur la nature du carburant, celui-ci conditionnera également le système de post-traitement avant rejet des effluents gazeux à l'atmosphère. La filière gaz naturel peut à ce titre apparaître intéressante, grâce à de meilleurs rendements en mélange pauvre, mais nécessitera en sortie un catalyseur de combustion. L'introduction d'hydrogène (ou de gaz de synthèse) favorisant l'auto-inflammation des hydrocarbures est également une stratégie actuellement examinée. Une boucle de recirculation des gaz d'échappement vers le moteur (EGR), qui reforme partiellement les hydrocarbures imbrûlés ou post-injectés, est en cours de développement industriel.

D'autres technologies telles que la combustion catalytique semblent mal adaptées à la traction automobile du fait de la faible durée de vie du catalyseur de la chambre de combustion.

En ce qui concerne le pot catalytique, les enjeux pour les moteurs essence résident essentiellement dans l'identification de formulations catalytiques plus actives permettant d'abaisser la température de conversion des polluants (light-off) et réduire la teneur en métaux précieux (et donc le coût du catalyseur). Les défis pour les véhicules diesel sont plus ambitieux puisqu'aucune technologie efficace et robuste permettant de réduire les oxydes d'azotes n'a réellement fait ses preuves. Par ailleurs, l'intégration sur le véhi-

cule des différentes fonctions catalytiques : catalyseur d'oxydation du CO et des hydrocarbures volatils, filtre à particules pour éliminer les suies et catalyseurs deNOx, reste problématique en terme d'efficacité, de gestion de la thermique, de surconsommation carburant (et donc émission de CO<sub>2</sub>) et de coût (teneur en métaux précieux notamment). La découverte de formulation catalytique plus efficace et plus économe en carburant reste à faire. Des attentes sont également exprimées vis-à-vis de matériaux multifonctionnels permettant de réduire le nombre de monolithes catalytiques sur la ligne d'échappement.

La complexité croissante de la chaîne de traction thermique et des systèmes de post-traitement, en particulier, offre des possibilités stimulantes aux réflexions autour de l'ingénierie des systèmes et du génie des procédés.

À terme des procédés économiques de recyclage des catalyseurs de dépollution automobile, riches en métaux précieux, devront être développés.

### **Diminution des rejets**

À nouveau sous la pression des normes environnementales, de nombreux procédés catalytiques sont désormais employés pour le traitement et l'épuration d'effluents contaminés, gazeux et liquides, tant au niveau industriel que domestique. De plus, la forte médiatisation, fondée ou non, de l'impact du CO<sub>2</sub>, un des plus abondants effluents à effet de serre, sur l'évolution climatique a fortement dynamisé la recherche en matière de dépollution, en associant étroitement la catalyse aux procédés plus physiques de séparation, séquestration et stockage. Ainsi de nombreux et nouveaux défis restent à relever pour les années à venir, autour du CO<sub>2</sub> :

- développer une chimie basée sur la conversion-valorisation du CO<sub>2</sub> et intégrant les bilans énergétiques ; CO<sub>2</sub> est en effet, potentiellement, une source remarquable de molécules en C<sub>1</sub> (CO, méthanol) d'usage courant et permet l'homologation de substances organiques (conversions en acides, etc.) ;

Toute la chimie de synthèse de carbonates (DMC, DEC, etc.) directe à partir du CO<sub>2</sub> reste à optimiser pour remplacer les procédés hautement toxiques actuels (utilisant le phosgène par exemple) ;

- en appui de cette nouvelle catalyse du CO<sub>2</sub>, la recherche pour garantir des sources de CO<sub>2</sub> fiables et abondantes devient une priorité. À cette fin, le développement de nouveaux matériaux comme les zéolithes à très larges pores ou des hybrides micro-mésoporeux (type MOF) utilisables dans des procédés industriels de type pression swing adsorption (PSA) permettront de séparer efficacement le CO<sub>2</sub> du gaz naturel par exemple. De même, la capture du CO<sub>2</sub> à la source de production (réactions de combustion) est aujourd'hui un objectif fortement soutenu par la plupart des programmes incitatifs (FP7, ANR, ADEME, etc.) ;

- développer des procédés de combustion facilitant la récupération économique du CO<sub>2</sub> comme les procédés d'oxycombustion ou les procédés CLC (Chemical Looping Combustion) fondés en partie sur la découverte de matériaux performants ;

Concernant le traitement des effluents gazeux ou liquides, d'autres défis persistent comme :

- remplacer les catalyseurs liquides tels que H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HF par des catalyseurs solides (objectif commun avec la chimie) ;

- recycler les catalyseurs usagés (objectif commun avec la chimie) ;

- augmenter les performances des catalyseurs existants pour diminuer les rejets gazeux : nouveaux catalyseurs de FCC ou d'HDT, traitement des fumées, abattement des COV, combustion à basse température (< 200 °C en général ou < 250-300 °C pour le méthane), etc. ;

- réaliser le traitement de l'eau par voie catalytique ou bio catalytique.

- améliorer la performance (cinétique et spectres d'action) des procédés de dépollution par photocatalyse.

## Chimie de base

En chimie de base, l'évolution technologique est souvent freinée par l'intégration dans les usines existantes et par des marges de coût relativement faibles. Les défis sont à la taille des enjeux avec en particulier le remplacement du vapocraquage, procédé thermique coûteux en énergie, par un procédé catalytique alternatif et l'oxydation sélective directe des alcanes ( $C_2$  à  $C_8$ ), ressource bon marché, pour remplacer les procédés utilisant des oléfines. Malgré des recherches intenses, les défis restent posés et des sources alternatives d'oxydants sélectifs comme le  $N_2O$ , associées à des réacteurs innovants, comme les réacteurs à membranes denses conductrices d'anions  $O_2^-$  sont des orientations qui restent à approfondir.

L'amélioration de la sélectivité tant en oxydation qu'en hydrogénation/déshydrogénation (par exemple éthane  $\rightarrow$  éthylène, benzène  $\rightarrow$  cyclohexène ou acétylène  $\rightarrow$  éthylène) reste d'actualité, malgré certains progrès récents. De même la chimie de l'azote reste à optimiser, depuis la consommation d'énergie induite par la synthèse de l'ammoniac jusqu'aux nombreuses et difficiles réactions d'insertion de l'atome d'azote.

L'intérêt d'utiliser la bio-masse en alternative aux coupes pétrolières devra également être approfondie au-delà des matières premières comme le bio éthanol.

## Nouveaux synthons issus de la bio-masse

Le développement économique de filières basées sur l'exploitation en chimie de spécialité des ressources renouvelables est un champ nouveau et riche, et requiert une catalyse originale et innovante, liée aux techniques d'extraction et de séparation. Ainsi l'extraction de coupes phénoliques à partir d'huile de pyrolyse de la bio-masse pourrait se combiner à l'extraordinaire diversité des chimies liées à la valorisation de ressources abondantes comme la ligno-cellulose. De cette façon, la synthèse de molécules bio-actives à partir de la catalyse du Pd avec des technologies innovantes de cou-

plage croisé pourrait garantir des taux de pollution des produits finis conformes aux normes en vigueur. De nombreuses molécules aromatiques d'intérêt pourraient être accessibles par délignification contrôlée.

Dans le domaine connexe des **polymères**, de nouveaux catalyseurs sont nécessaires pour améliorer les propriétés des polymères (en particulier contrôle accru de la tacticité), développer des copolymères à propriétés spécifiques et développer une filière de recyclage. Pour l'instant seul le PET a pu déboucher sur une filière simple de recyclage mais l'ensemble des polymères usagés représente une source nouvelle d'oléfines.

Signalons enfin le développement de nouveaux matériaux hybrides pour les allègements de structure, à base de fibres végétales (lin, chanvre...), appliqués à l'industrie automobile ou aéronautique.

## Chimie fine et pharmacie

Dans ce domaine, le constat dressé lors du précédent rapport de conjoncture reste d'actualité. Ce secteur, qui fait le lien avec les sciences du vivant, recouvre les catalyses hétérogène, homogène et enzymatique et la variété des tonnages et des acteurs sont considérable. La valeur ajoutée de ce secteur et les retombées sociétales en font aussi un domaine très attractif pour les chercheurs. En général, les réactions se font en phase liquide à des températures assez basses en raison de la faible stabilité thermique des molécules concernées. Un défi majeur en chimie fine est le remplacement des réacteurs batch multi-usages par des réacteurs en continu dédiés. Les freins sont nombreux mais le potentiel offert par le passage en continu, ne serait-ce que pour la réduction des rejets est considérable. Les procédés «one pot», qui intègrent plusieurs étapes à ce jour dissociées, apparaissent également comme des cibles importantes pour l'intensification des procédés.

Citons quelques objectifs majeurs :

- le contrôle de la sélectivité en oxydation, pour diverses fonctions chimiques spécifiques, en particulier en catalyse hétérogène ;

– la synthèse multi-étapes intégrée soit par des catalyseurs multi-fonctionnels soit par la synthèse en continu sur des catalyseurs en série ;

– la production d'acides aminés et de vitamines (biotechnologies) ;

– le traitement des eaux : réduction des nitrates, conversion des sels d'ammonium, hydrodéchloration, élimination des traces de médicament ;

– une meilleure maîtrise de l'effet des solvants ;

– l'organocatalyse et la catalyse organométallique utilisant des ligands simples.

Un domaine apparenté est celui de l'encapsulation et de la diffusion contrôlée de médicaments, basé sur des concepts analogues de la catalyse hétérogène (adsorption sur sites) et sur des matériaux poreux communs.

## 2.4 DÉFIS TECHNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

Une série de défis technologiques et méthodologiques structurent également la prospective de recherche selon des axes transverses aux axes évoqués précédemment.

### Catalyse prédictive ou la recherche de « relations quantitatives entre la structure et l'activité » (QSAR) robustes et vérifiées

Graal permanent de la recherche en catalyse, la perspective de pouvoir prédire les performances de catalyseurs ou de procédés catalytiques impose des démarches préalables comme i) la possibilité d'observer un catalyseur de façon aussi précise et documentée que possible ; c'est *l'analyse operando* et ii) la possibilité de *modéliser une surface active* sans simplification excessive, comme le permet la *chimie théorique* avec des tech-

niques avancées de DFT ou simulation MC. Cette double démarche, associée à des **corrélations statistiques issues de l'expérimentation à haut débit**, pourrait ouvrir la voie à des QSAR validés et réellement prédictifs.

**Observation de la catalyse operando.** Les principales techniques d'analyse spectroscopiques de surface ou de cœur comme l'IR (transmission ou réflexion diffuse), l'UV-visible, le Raman, la RPE, la DRX, les neutrons, l'EXAFS, les microscopies électroniques sont désormais couramment mises en œuvre dans des conditions de plus en plus réalistes (température, pression, présence des gaz de réaction qui tend à résorber « le fossé de la pression », etc.). Un tel développement méthodologique accroît fortement la connaissance des catalyseurs à l'échelle moléculaire, donc des mécanismes réactionnels, ce qui ouvre directement à la modélisation de ces processus. Les défis à venir sont d'augmenter **la sensibilité moléculaire et la résolution spatiale et temporelle**. Ainsi pourrait être obtenue une image dynamique d'un processus catalytique avec des informations à la fois inorganiques (état de la structure superficielle d'une surface en cours de fonctionnement) et organiques (état de la structure moléculaire des espèces en cours de réaction catalytique). Une résolution spatiale de l'ordre du nanomètre semble possible pour la décennie à venir. L'étape suivante serait de visualiser les changements électroniques au sein de ces systèmes organiques/inorganiques pour expliquer (donc prédire) l'orientation d'une réaction à partir des complexes activés. Des possibilités d'analyse rapide à la résolution de la nanoseconde ont été récemment démontrées, permettant ainsi la mise en évidence d'espèces intermédiaires. Une nouvelle orientation de l'observation *operando* vers la catalyse triphasique serait un progrès considérable en direction de la chimie fine. D'un point de vue méthodologique, l'association intelligente de plusieurs spectroscopies complémentaires semble incontournable, ce qui pourrait remettre au goût du jour la mutualisation et la concentration des moyens dans des unités spécialisées.

### **Modélisation des surfaces actives.**

Le développement des approches moléculaires de la catalyse évoquées précédemment trouve évidemment un relais idéal dans le calcul théorique, lui-même fondé sur des caractérisations physiques avancées. L'accélération des calculs de type *ab initio* et DFT, et l'intégration d'approches complémentaires comme les méthodes moléculaires quantiques et chimiques, les simulations de l'état solide et les méthodes de dynamiques moléculaires doivent permettre de poursuivre cette transition de systèmes modèles sur-simplifiés (ex : adsorption d'un atome d'hydrogène sur un cluster de quelques atomes métalliques) vers des systèmes plus réalistes (diversification des structures et des atomes, simulation des défauts, nano domaines, relaxations de surface sur plusieurs couches, etc.), représentatifs d'une catalyse réelle. Ainsi, cette modélisation précise des surfaces actives permettrait de prédire la sensibilité ou l'insensibilité d'une réaction donnée à la structure du catalyseur, ainsi que les phénomènes de désactivation. À noter qu'un effort considérable doit être entrepris pour rendre les échelles de temps et d'espace de la modélisation théorique (de l'ordre de la picoseconde et de l'Å) compatibles avec celles d'un événement catalytique moyen (milli seconde et échelle nanométrique, voir micrométrique). La combinaison de diverses méthodes pourrait répondre à ce défi.

**Expérimentation à haut débit et analyses statistiques.** L'efficacité de l'expérimentation à haut débit est désormais prouvée mais l'exploitation des données reste un défi. En développant de nouvelles méthodologies pour décrire un système catalytique complexe grâce aux plans d'expérience, la caractérisation accélérée combinée au calcul a priori de données texturales et structurales, l'approche haut débit crée de nouveaux champs de « descripteurs » soit spécifiques des matériaux, soit liés aux étapes clé de la cinétique de la réaction. Ces champs de descripteurs peuvent ensuite faire l'objet d'analyses statistiques (analyse des composants principaux, arbres de corrélations, algorithmes génétiques, etc.) en vue de les relier mathématiquement aux performances catalytiques (par exemple par le biais de

réseaux artificiels de neurones). Ces démarches de type QSAR sont directement complémentaires des approches *operando* et théoriques évoquées précédemment.

La synthèse réussie de ces différentes approches de la catalyse prédictive pourrait résoudre nombre des défis scientifiques identifiés dans cette analyse de prospective.

## **Génie du catalyseur et du procédé catalytique**

Le **couplage entre la catalyse et le génie des procédés** reste une voie majeure de progrès en terme de performances et de crédibilité de la recherche en catalyse. En effet, la conception d'un système catalytique pour une application donnée qui intègre un concept de réacteur adapté permet, après validation des performances et comparaison avec des réacteurs conventionnels, d'engager une étude de dimensionnement et d'extrapolation à l'échelle pilote. À la clé, une perspective crédible de commercialisation.

Une démarche connexe à ce couplage concerne la **structuration des catalyseurs**, c'est-à-dire leur préparation dans une forme adaptée au type de réacteur envisagé. Pour des réactions rapides, une faible perte de charge (résistance au débit gazeux) sera privilégiée par une mise en forme sur réacteur monolithe de type nid d'abeille. Si une gestion stricte de la chaleur de réaction est requise pour éviter par exemple les échauffements locaux susceptibles de dégrader le catalyseur, des supports conducteurs de chaleur comme des mousses métalliques ou de SiC seront utilisées, combinés à un contrôle strict de la morphologie des grains (phase active plus support) de catalyseurs. Le développement rapide de nouveaux matériaux issus, par exemple, de la recherche en métallurgie ou supports pour l'électronique facilite la créativité dans ce domaine de la structuration des catalyseurs. Deux exemples de réacteurs structurés illustrent cette ouverture :

– **Les réacteurs à membranes** : que ce soit par enrichissement d'un gaz par diffusion

ou par génération d'espèces actives au travers de membranes denses, l'utilisation de membranes permet de contourner les limitations thermodynamiques et de modifier le rendement en intermédiaires réactionnels. Le couplage membrane/catalyse est de nature, si l'extrapolation industrielle est maîtrisée, à permettre des avancées spectaculaires. Les verrous sont justement centrés sur ce dimensionnement, donc relèvent à ce jour essentiellement du génie des matériaux (par exemple, passage d'une membrane plane à un système multitubulaire dont la surface s'approche d'un réacteur multitubulaire à lit fixe industriel).

– **Les microréacteurs ou réacteurs micro-structurés** ont fait l'objet ces dernières années de développements académiques intenses, mais à nouveau le blocage réside dans le dimensionnement (et aussi en France dans la quasi absence d'une industrie PME susceptible de développer cette technologie). Ces réacteurs à temps court et à micro-fluidique contrôlée ouvrent de nombreuses perspectives dans le domaine d'une gestion plus rationnelle de l'énergie, par exemple en permettant le couplage de réactions exo et endo thermiques. Leur temps court de réponse et faible inertie massive et thermique facilitent également la mise en œuvre de procédés non stationnaires avec des gains de sélectivité et de rendement importants. Ainsi, le développement de microréacteurs à fonctionnement alterné ou de réacteurs à lit circulant reste d'actualité pour des productions délocalisées, un meilleur contrôle du volume d'intermédiaires toxiques, des réactions isothermes et non adiabatiques. Éléments incontournables de l'intensification des procédés, l'assemblage de ces réacteurs micro-structurés pourrait préfigurer les usines du futur.

Le dépôt des catalyseurs dans ces espaces confinés mérite également des efforts de mise au point comme par exemple le contrôle des méthodes CVD ou assimilées (maîtrise des compositions et épaisseurs de phases déposées sur les substrats microstructurés) ou l'activation « physique » par des méthodes de plasma, micro-onde, ultrason.

**De nouveaux média réactionnels** peuvent être également mentionnés dans ce

domaine du génie des procédés. Les milieux ioniques, la catalyse en conditions super-critiques, la catalyse par transfert de phase, la distillation catalytique sont autant d'exemples où l'utilisation de conditions non conventionnelles permet de développer une nouvelle chimie ou de limiter l'utilisation de solvants polluants.

## 2.5 CHAMPS THÉMATIQUES TRANSVERSES

Comme évoqué précédemment, quelques champs thématiques pluri- et trans-disciplinaires semblent focaliser l'attention de la communauté de la catalyse (sans exclusive) comme le traduisent les différents appels à propositions en cours, tant européens qu'hexagonaux. On peut citer celui des nanosciences et nanomatériaux et celui de l'utilisation des ressources renouvelables dans une stratégie de développement durable.

**L'utilisation et la mise en œuvre de nanomatériaux** sont à la base de la catalyse hétérogène puisque par définition, les catalyseurs sont des nanomatériaux ! Les nanomatériaux sont déjà très largement développés, d'abord pour l'industrie pétrolière ou pétrochimique, puis pour les applications catalytiques courantes comme les pots catalytiques des véhicules à moteur, les réacteurs d'hydrogénation ou de déshydrogénation en phase gazeuse et d'oxydation ménagée ou totale des hydrocarbures. De nouvelles stratégies de synthèse de matériaux nanostructurés et de nanoparticules métalliques ou d'oxydes permettent désormais d'élaborer des catalyseurs en contrôlant chacune des étapes de leur design, depuis la nature et la fonction des précurseurs moléculaires jusqu'aux caractéristiques physico-chimiques des charges des réacteurs. Ces approches ont permis des avancées fondamentales décisives sur la compréhension des relations existant entre les (nano)phases actives et leurs supports et contribué à réduire le fossé entre catalyses homogène et hétérogène. Des

réalisations ont ainsi déjà été accomplies dans la conception de catalyseurs pour la production de polymères fonctionnels et de catalyseurs hétérogènes pour la catalyse énantioselective.

Enfin, de nouvelles familles de nanomatériaux, tels les nanocomposites, les nanotubes de carbone ou d'autres matériaux inorganiques comme le SiC ou des fibres d'alumine, la nouvelle famille extraordinairement variée des matériaux hybrides de type MOF se révèlent d'excellents supports de catalyseurs. Leurs propriétés de surface en termes de mouillabilité ou de polarité par exemple, sont largement adaptables aux exigences de la réaction, autorisant des gains de sélectivité et de sélectivité remarquables.

Le défi principal consiste à **maîtriser la synthèse de ces nanomatériaux à l'échelle moléculaire**. En effet, la réactivité (activité et sélectivité) du site actif dépend directement de :

- sa nature chimique qui contrôle la dissociation et la création des liaisons chimiques (à l'échelle de l'Å),

- son environnement local (caractéristiques hydrophobes ou hydrophiles),

- son accessibilité (échelle nano à micro-métrique) qui détermine l'impact des phénomènes diffusionnels souvent combinés à ceux de la catalyse intrinsèque.

Les progrès spectaculaires et très diversifiés obtenus récemment dans l'agencement d'édifices supramoléculaires, précurseurs de catalyseurs hétérogènes ultra dispersés ou la maîtrise de nouvelles matrices tridimensionnelles de type zéolithes conduisant à la création de sites isolés et parfaitement décrits doivent être poursuivis pour rapprocher encore plus les diverses disciplines spécialistes des nanomatériaux. Par exemple, la réalisation d'objets moléculaires totalement inédits comme des nanoparticules liées entre elles par des ligands organiques ou hybrides ouvre des perspectives au moins comparables à celles des MOFs comme catalyseurs en chimie douce.

**L'utilisation de la biomasse comme ressource renouvelable** a déjà été évoqué

de façon récurrente tout au long de cette analyse de prospective. Les principaux objectifs et contraintes restent de cibler les applications possibles selon la disponibilité de ces ressources, la variabilité de leur composition et le coût énergétique de leur valorisation. Cette dernière comblera nécessairement de nombreuses étapes d'extraction/séparation, de synthèse (dépolymérisation, déoxygénation, hydrodéshydrogénation, isomérisation, etc.). Ces ressources incluant les matières grasses, la cellulose et les lignines, leur valorisation est largement ouverte depuis l'énergie (carburants de nouvelles générations) jusqu'à la chimie de spécialité et la pharmacologie. Il semble urgent de considérer aussi que la valorisation de la biomasse crée également une pollution non négligeable (de part l'abondance des déchets non traités) et donc que la voie « bio » en catalyse doit également se préoccuper du traitement de ses rejets.

**Impact environnemental et sociétal de tout nouveau procédé : une préoccupation incontournable !**

Notons enfin que le développement des analyses de cycle de vie (ACV) devient impératif pour tout nouveau catalyseur ou procédé catalytique proposé et que cette approche encore très confidentielle au niveau académique, mais de plus en plus utilisée dans l'industrie, devra être prise en compte à l'avenir dans tout projet novateur.

## 3 – CONJONCTURE ET PROSPECTIVE EN SCIENCE DES SURFACES ET INTERFACES

### 3.1 INTRODUCTION

- La science des surfaces et des interfaces représente une des trois thématiques majeures de la section 14 en même temps qu'un

domaine par essence pluridisciplinaire : fondée à la fois sur les bases de la physique et de la chimie, elle est impliquée dans des domaines de recherche tels que la catalyse hétérogène, la microélectronique, la corrosion, les capteurs, l'adhésion, la biocompatibilité... Ainsi, la science des surfaces et interfaces possède un champ d'applications très étendu incluant notamment, pour des matériaux à haute valeur ajoutée, les domaines de l'énergie, de l'environnement, de la santé, des nanosciences, des sciences du vivant ou de l'analyse chimique. Il faut noter également l'importance que revêt la notion de surface dans des systèmes réels où les quelques nanomètres les plus externes du matériau ont souvent une composition voire une structure différente du volume du fait de l'interaction avec le milieu ambiant. Même ultra-mince (nanométrique), une couche oxydée réelle de surface peut jouer un rôle majeur dans l'interaction des matériaux métalliques avec l'environnement : c'est le cas de la passivation des aciers inoxydables. Dans tous ces secteurs, la science des surfaces joue deux voire trois rôles : apport de connaissances fondamentales, développement d'outils d'élaboration et méthode de caractérisation fine.

Le développement spectaculaire des études de surfaces est possible grâce au développement de nouveaux outils permettant l'étude *in situ* de surfaces allant jusqu'à l'échelle nanométrique (accès à des informations moléculaire ou atomique). Parmi les techniques les plus utilisées et en plein essor, on peut citer :

- les spectrométries vibrationnelles spécifiques aux interfaces : spectroscopie infrarouge en réflexion rasante (IRRAS et PM-IRRAS), la microscopie infrarouge ou l'infrarouge au rayonnement synchrotron ainsi que la spectroscopie de génération de fréquence somme (SFG),

- les techniques d'absorption de photons X (XAS)

- les techniques de photoémission couvrant l'XPS conventionnel, *in situ*, la photoémission résonante ou encore la microscopie

de photoélectrons (X-PEEM), permettant d'accéder à une information chimique de surface, quantitative,

- les techniques de champ proches comme la microscopie à effet tunnel (STM) ou la microscopie à force atomique (AFM) qui permettent maintenant d'obtenir des informations structurales sur tous les types de matériaux (conducteurs ou non), dans des environnements variés (vide, gaz ou liquide) à l'échelle d'investigation nanométrique,

- les microscopies électroniques environnementales à balayage (SEM) ou à transmission (TEM), permettant d'obtenir des informations morphologiques et structurales,

- les spectrométries ioniques de surface telles que la spectrométrie de masse d'ions secondaires (SIMS) ou d'ions rétrodiffusés (ISS ou LEIS), en mode dynamique ou en mode statique, à temps de vol (ToF-SIMS). La France connaît un regain dans l'équipement de ces techniques de pointe de caractérisation des surfaces (10 appareils complets achetés entre 2005 et 2010), en particulier dans les laboratoires rattachés à la section 14. Par l'intermédiaire de ces outils, on accède à une information chimique d'extrême surface, ainsi qu'à des possibilités d'imagerie intéressantes.

- Il faut particulièrement souligner, en parallèle des approches classiques de laboratoire, l'apport fourni, d'une part par des techniques utilisant des grands instruments (notamment le synchrotron), et d'autre part, par la simulation ou modélisation numérique qui profite de l'augmentation de puissance des outils de calcul afin de pouvoir étudier, à l'échelle moléculaire, le comportement de systèmes de plus en plus complexes. Parmi ces outils, ceux développés par la chimie théorique sont fondés sur la résolution la plus exacte possible de l'équation de Schrödinger du système étudié. Ils permettent en particulier de décrire des structures, toutes leurs propriétés électroniques et spectroscopiques (RMN, IR, RAMAN, RPE etc.), d'évaluer des phénomènes de transfert de charge ou de modéliser la réactivité chimique. Les techniques correspondantes sont, pour la plupart d'entre elles,

*ab initio*. Ces approches permettent désormais de calculer d'ores et déjà des systèmes comprenant quelques dizaines d'atomes que ces systèmes soient des systèmes moléculaires ou périodiques. En revanche, la caractérisation de systèmes contenant plusieurs centaines voire des milliers d'atomes, requiert l'utilisation des approches dites « classiques » reposant sur une description empirique des interactions inter-atomiques (champs de force) et/ou des approches de mécanique statistique qui permettront de d'accéder à des grandeurs thermodynamiques par exemple. L'utilisation de méthodes « mésoscopiques » (méthodes « gros grain » ou de dynamique Brownienne) vont permettre de décrire des objets encore plus gros et à des échelles de temps encore plus grandes pour simuler par exemple la formation de silice mésoporeuse.

La simulation numérique est ainsi devenue un instrument important aussi pour les études de surface, et qu'il faut voir comme complémentaire des approches expérimentales puisqu'elle permet d'accéder à des données et à des conditions environnementales mal couvertes par les expériences, grâce par exemple, à la thermodynamique quantique. Elle permet également l'étude de étapes élémentaires des réactions de surface liées à la catalyse et a ainsi permis une évaluation réaliste des barrières cinétiques qui interviennent ainsi que la proposition de mécanismes réalistes complets, tandis que l'expérience n'est sensible qu'aux étapes déterminantes.

- Si les études de surface se sont d'abord développées dans le contexte de systèmes modèles, elles ont aussi permis directement ou indirectement un développement dans le contexte appliqué. Ceci s'est fait d'une part par l'apport conceptuel, et, d'autre part, par les outils de caractérisation qu'elles ont générés.

Dans le domaine de la chimie des surfaces, les interactions de molécules avec des surfaces métalliques ou de semi-conducteurs représentent toujours une grande part des études. Les surfaces d'oxydes sont l'objet d'un nombre croissant de travaux en relation avec leur intérêt technologique potentiel. De plus, une évolution très nette a vu le jour très récem-

ment vers des études de fonctionnalisation de surface et celles d'interfaces entre des biomolécules et des matériaux inorganiques. Enfin l'élaboration *in situ* de nanostructures représente un domaine en plein développement, qui utilise à la fois la chimie de surface pour des croissances type « bottom-up » fondées sur la réactivité interfaciale, et des techniques de nanostructuration plus « physiques » comme par exemple les techniques de champ proche. Ceci permet l'obtention de nanoobjets à fonctionnalité adaptée. L'organisation de ces nanostructures sur les supports permet de les utiliser comme « templates » pour l'autoassemblage d'édifices moléculaires.

Il faut signaler le rôle particulièrement important joué par l'or nanométrique, qu'il soit sous la forme de nanoparticules, supportées ou non, ou de nanostructures : réputé inactif à l'état massif, il présente à l'échelle nanométrique des propriétés intéressantes qu'il est fondamental de maîtriser. À la fois la compréhension de ces mécanismes fondamentaux et les applications possibles dans des domaines aussi variés que la catalyse, la biologie, la thérapie, l'optique, etc. ont justifié la création du GdR Or-Nano.

- D'un point de vue stratégique, il est important de prendre conscience de la faiblesse relative de la chimie des surfaces en France. Après des développements prometteurs, l'insuffisance des soutiens par les organismes de recherche depuis de nombreuses années s'est traduite par un recul global prenant actuellement des dimensions dramatiques avec les départs en retraites non compensés. C'est tout un savoir faire conceptuel et instrumental qui est en danger.

### **3.2 SURFACES-INTERFACES : LA COMPRÉHENSION ET LA MAÎTRISE DU SITE ACTIF**

La fonctionnalisation de surfaces métalliques, de mieux en mieux contrôlée d'un point de vue structural et chimique sera

encore fortement développée pour la protection de matériaux (anti-corrosion, anti-biofilms) et aussi pour l'élaboration de surfaces catalytiques (catalyseurs énantiosélectifs), biocompatibles et/ou bioactives. Ce domaine bénéficie des avancées des connaissances des physico-chimistes quant aux mécanismes d'adsorption mais aussi des techniques opérant en milieu réactif, gazeux ou liquide. On voit aussi ici une interaction nécessaire avec les bio-inorganiciens pour mettre au point des protocoles de mesures d'activité en phase immobilisée ou encore appréhender les transferts électroniques entre métallo-protéines et surfaces.

Les progrès des techniques d'analyse, leur utilisation *in situ*, l'accès aux plates-formes instrumentales, aux grands instruments sont en train de révolutionner l'approche de la réactivité de surface. Il faut poursuivre les efforts dans cette direction. Les fédérations de moyens doivent faire face au coût des appareils d'analyse. Dans le domaine de la catalyse, l'approche globale fait place à une approche locale, d'une part en contrôlant la répartition en taille des objets (problématique souvent rencontrée en section 14), d'autre part en analysant la surface active dans des conditions de fonctionnement. La notion de site moléculaire prend ici tout son sens. On peut citer, dans le domaine de l'électrochimie interfaciale, le très fort développement de méthodes inspirées des microscopies à champ proche (microscope électrochimique à balayage et impédance locale) qui permettent de combiner les analyses résolues en temps (ou en fréquence) et dans l'espace avec des avancées déjà réalisées à l'échelle nanométrique. C'est une preuve de la complémentarité entre ces deux disciplines de la section.

Par ailleurs, la modélisation des phénomènes de surface continue de gagner en précision grâce à l'amélioration des méthodes de calcul utilisées pour les simulations numériques et grâce à la puissance accrue des moyens de calculs. Il est désormais possible d'étudier l'adsorption de molécules sur des surfaces métalliques ou oxydées, de considérer le solide réel, d'étudier la réactivité de molécules et de surfaces. Les études d'adsorption sont généralement réalisées par des méthodes classiques (dynamique moléculaire)

tandis que les études de réactivité utilisent la chimie quantique au moyen de calculs périodiques ou non. Ainsi, la plupart des laboratoires s'intéressant aux phénomènes de surfaces et d'interfaces, associent maintenant un groupe/un chercheur qui aborde ces phénomènes par le calcul.

L'application des techniques de la lithographie (de la microélectronique) à l'élaboration de nanostructures ordonnées et présentant un gradient de propriétés (matériaux à plusieurs composants par exemple) couplée à l'observation rapide («à haut débit») des phénomènes recherchés (adsorption sélective, réactivité chimique), est une voie moderne à envisager pour le développement de nouveaux capteurs, de nouveaux catalyseurs, etc. Cette voie deviendra efficace avec le développement parallèle des nanotechnologies.

Il faut noter le recours de plus en plus fréquent aux approches de type science des surfaces ou aux techniques d'analyses de surfaces de chercheurs de disciplines connexes telles que l'électrochimie interfaciale, la corrosion ou la catalyse. Ceci est lié à l'évolution de ces disciplines vers la compréhension des phénomènes à l'échelle locale, vers l'identification du site actif. Ces domaines bénéficient ainsi des apports que la science des surfaces peut fournir sur des surfaces modèles. Il est fondamental qu'à l'avenir ces types de recherches soient développés car c'est à cette condition que les disciplines connexes pourront continuer leur progression vers la compréhension des mécanismes élémentaires. Ceci passe à la fois par les possibilités de développement des matériels et des effectifs.

Le grand défi pour cette thématique est celui du maintien à niveau des ses matériels et de ses effectifs.

### 3.3 LES NOUVEAUX PROCÉDÉS DES TRAITEMENTS DE SURFACE

Il apparaît de plus en plus que les nouveaux procédés de traitement des surfaces peu-

vent contribuer à des progrès remarquables. On peut penser aux procédés physiques, nanostructuration ou texturation de surface, traitements par laser des surfaces métalliques, pulvérisation plasma réactive ou non, aux traitements chimiques de la surface, greffage de fonctions moléculaires, procédés sol-gel, dépôts à partir de composés organométalliques. Bien des propriétés peuvent être recherchées : optiques, d'anticorrosion, bactéricides, d'auto-nettoyage, de mouillage... La compréhension fine des mécanismes physicochimiques en jeu aux surfaces et interfaces est un préliminaire nécessaire à l'obtention de propriétés données, les procédés de caractérisation et d'analyse des surfaces étant des outils indispensables.

La fonctionnalisation des surfaces est un verrou majeur dans la conception des nouveaux matériaux et sa mise en œuvre ouvre des pistes de recherche très opportunes. La biomimétique est un de ces axes importants de la fonctionnalisation des surfaces. Les enjeux sociétaux sont considérables : mise au point de procédés sans rejets de solvants chlorés ; lutte contre l'usure et la dissémination des espèces, fonctionnalisations utiles pour la santé (objets thérapeutiques, verres, etc.).

Les assemblages multi-matériaux deviennent de plus en plus étudiés, car potentiellement porteurs : dans le domaine du soudage on pense au développement du soudage laser et au soudage pour friction au collage. La durabilité des assemblages met en œuvre des interfaces à diverses échelles qui raccordent des structures souvent constituées de matériaux différents qui réalisent des multi-matériaux, voire des composites (métal-polymères, etc.), des matériaux granulaires (bétons, liants, etc.).

L'électrodépôt est un domaine d'avenir car il permet, grâce aux progrès réalisés dans la maîtrise de la qualité des dépôts, l'obtention de couches bi ou monodimensionnelles. Ces études, qui vont du très fondamental au diagnostique, tirent profit des moyens d'analyse *in situ* et tout particulièrement des microscopies à champs proches.

De plus l'utilisation des liquides ioniques comme électrolytes pour élaborer des dépôts

métalliques a conduit à une qualité des dépôts comparables à celle de dépôts effectués en sels fondus sans en avoir les inconvénients. Elle permet en outre d'effectuer des dépôts de polymères conducteurs. La grande variété des liquides ioniques déjà connus et potentiels laisse entrevoir une palette d'applications d'une très grande richesse.

### 3.4 ÉLECTROCHIMIE : LES ENJEUX DE LA MAÎTRISE DU TRANSFERT D'ÉLECTRON

#### Introduction

Les réactions électrochimiques sont les phénomènes qui ont lieu à l'interface de deux systèmes conducteurs (électronique et ionique) lors du transfert de charge composé d'un ou plusieurs électrons. Ces transferts de charges s'accompagnent de modifications des états d'oxydation des matériaux (oxydation ou réduction) et donc de leur nature physico-chimique (dépôt métallique, évolution de gaz, formation d'espèces radicalaires, réactions chimiques couplées...).

Aussi, l'électrochimie a pour objectif la maîtrise de l'ensemble des processus induits par un transfert de charge, avec pour finalité l'étude de mécanismes réactionnels, la modification de surfaces et de matériaux, la production d'énergie, l'utilisation des techniques électrochimiques en chimie analytique. La diversité de ces applications se manifeste à la fois par de nombreux partenariats industriels et par des études à caractère très fondamental faisant de l'électrochimie une discipline.

Cette diversité fait également de l'électrochimie une discipline présente en chimie organique, en chimie organométallique, en chimie inorganique, en chimie du solide, en chimie analytique, en biochimie, en chimie du vivant mais aussi dans des disciplines traitant de physique, de géologie, d'environnement ou de génie des procédés.

Au sein du comité national, l'évaluation et la prospective en électrochimie sont réparties

essentiellement entre les sections 13 et 14. La section 13 s'intéresse principalement à la partie de l'électrochimie traitant de la réactivité et des mécanismes réactionnels électrochimiques, de l'électrosynthèse organique, de l'électronanalyse et de la bioélectrochimie. Au contraire, la section 14 regroupe, en grande partie, les chercheurs qui s'intéressent :

- à la dimension interfaciale de l'électrochimie ;
- aux capteurs et biocapteurs électrochimiques ;
- aux phénomènes d'électrodépôt et d'électrocristallisation ;
- aux mécanismes de corrosion/protection ;
- à l'électrochimie des solides.

En outre, pour toutes ces applications, se développent et se perfectionnent de plus en plus les méthodes permettant de coupler des mesures électrochimiques avec des techniques de caractérisation *in situ* ou *ex situ*, avec en particulier des travaux réalisés sur grands instruments.

## Électrochimie interfaciale

L'électrochimie interfaciale s'intéresse à la description du transfert de charges intervenant entre une électrode et un électrolyte. Son but est d'établir les corrélations existant entre la structure microscopique formée par des atomes de surface et des adsorbats et la vitesse d'une réaction électrochimique mesurable à l'échelle macroscopique. Pour ce faire, les électrochimistes disposent de nombreux outils leur permettant de contrôler et mesurer de façon précise les phénomènes se déroulant pendant chaque étape du processus : transport des espèces réactives et des produits au sein de l'électrolyte, adsorption des espèces réactives sur l'électrode, réactions chimiques et électrochimiques à l'interface ou en solution.

L'état structural du matériau d'électrode est généralement caractérisé *ex situ* grâce à

des techniques développées par les chimistes ou physiciens des surfaces et utilisées avec succès pour l'étude des interactions solide-gaz (catalyse hétérogène) : diffraction d'électrons (LEED, RHEED), diffraction ou absorption des rayons X (DRX, XAS) et spectroscopie de photoélectrons X (XPS) ou spectroscopie Auger (AES). Ces dernières ont abouti à une description quantitative du rôle de la chimie et de la structure des surfaces sur les processus électrochimiques, de son évolution après adsorption d'atomes ou de molécules de solvant, et de son éventuelle reconstruction/oxydation après exposition au milieu électrolytique. Ces avancées ont amélioré notre compréhension des mécanismes réactionnels et ont servi efficacement la recherche fondamentale mais aussi la recherche appliquée (piles à combustible, capteurs, contrôle qualité). Toutefois, les informations délivrées, si puissantes soient-elles, n'assurent en rien que la structure de l'interface électrode électrolyte est la même en milieu ultra-haut vide qu'en milieu électrolytique. C'est pourquoi, durant ces dernières années, un grand nombre d'équipes ont travaillé pour coupler *in situ* des techniques physiques non destructives et l'électrochimie. L'ellipsométrie, par exemple, utilise le changement de l'état de polarisation de la lumière après réflexion sur une surface plane, ce qui permet l'étude de structures complexes comme des matériaux multicouches, présentant une grande rugosité de surface ou une inhomogénéité spatiale. Les rayons X (absorption, diffraction, diffusion) émis par un rayonnement Synchrotron nous fournissent des informations sur l'état de surface des matériaux en milieu électrolytique dont la qualité est désormais comparable à celles obtenues sous environnement ultra-haut vide (UHV). Ces techniques ont affiné notre compréhension des processus électrochimiques en permettant de rendre compte de l'influence du degré d'oxydation des éléments présents dans le matériau d'électrode, de sa structure cristallographique ou du rôle des adsorbats sur la vitesse des réactions électrochimiques. Les spectroscopies infrarouge-Raman et ultraviolet ont permis de nombreuses avancées à la fois dans la caractérisation des

interfaces utilisant des systèmes redox biologiques mais aussi dans l'accès aux mécanismes réactionnels et à la sélectivité de réactions électrochimiques. Enfin, des techniques dites « à balayage de sonde » ont été développées (SECM) ou adaptées (STM, AFM) pour l'analyse physico-chimique locale des interfaces électrochimiques de type conducteur/solution, et plus généralement solide/solution. Dans ce sens, le microscope électrochimique à balayage (SECM) mesure le courant produit par une réaction électrochimique se produisant sur une ultramicroélectrode ou sur la surface à analyser, ce qui permet d'imager la réactivité redox locale de cette dernière. Le même type de démarche est possible à l'échelle nanométrique sur la pointe d'un microscope à effet tunnel (STM). Ce dernier demeure toutefois largement utilisé pour réaliser des images « topographiques » d'une surface conductrice ordonnée (monocristaux) en présence d'un électrolyte (molécules de solvant), d'adsorbats d'intérêt pour une réaction donnée ou pour suivre le dépôt de métaux, d'un film de polymère ou d'objet biologiques tout en contrôlant le potentiel de l'électrode. En absence d'électrolyte liquide, des images STM à courant constant et à faible tension permettent aussi de cartographier les modulations spatiales de la densité d'états locale de la surface à une énergie donnée en vue de corrélérer structure et vitesse de réaction. La microscopie à force atomique (AFM) permet une caractérisation non seulement électrochimique mais de surcroît mécanique, électrique ainsi qu'une mesure des forces de surface *in situ*, à l'échelle locale, sur des matériaux d'électrodes métalliques ou semi-conducteurs. Plus récemment, le caractère aléatoire de certains événements électrochimiques a aussi généré des travaux de plus en plus précis sur l'exploitation de l'analyse temporelle ou spectrale du bruit électrochimique, particulièrement adaptés à des études de dégagements gazeux, de phénomènes de corrosion ou de diagnostic en temps réel. Sur les semi-conducteurs les travaux sur surfaces modèles ou parfaitement caractérisées ont progressé sensiblement. Le silicium peut aujourd'hui être considéré en milieu électrolytique comme un support

modèle pour des études très diverses. Les matériaux composés type III-V, II-VI, (I-III)-VI présentent des spécificités de comportement liées à la nature des constituants anioniques et cationiques, qui sont à présent bien répertoriées, voire maîtrisées. Leurs surfaces font l'objet, elles aussi, de multiples activités de recherche. Ces études électrochimiques sur semi-conducteurs donnent lieu à des travaux très divers, à caractère appliqué dans le domaine de la microélectronique, et vont en s'amplifiant. Comme pour les métaux, cette discipline a engendré des concepts propres qui arrivent à maturité et a bénéficié de la mise en œuvre de techniques complémentaires de caractérisation soit *ex situ* par analyses de surface, soit *in situ*, essentiellement par techniques optiques, le caractère semi-conducteur du support s'y prêtant tout particulièrement.

L'électrochimie interfaciale est donc une science dynamique en pleine expansion sous l'effet de plusieurs paramètres :

- la maîtrise de l'élaboration et de la caractérisation physico-chimique de ses objets d'étude ;
- la maturité de ses concepts ;
- l'analyse locale et *in situ* des phénomènes grâce à la manipulation des techniques de sondes, dont certaines sont propres à l'électrochimie ;
- le développement de la nano-électrochimie qui cherche à élaborer localement des clusters de taille nanométrique et à comprendre la nature des phénomènes électrochimiques qui s'y déroulent ;
- la recherche de sources d'énergie propres et respectueuses de l'environnement telles que les piles à combustible.

À ce jour, deux nouveaux champs d'investigation extrêmement dynamiques s'ouvrent : l'étude des interfaces électrode systèmes biologiques et la nano-électrochimie. Le transfert de charge entre électrode et objets biologiques (cellules, tissus, enzymes) reste extrêmement difficile à observer expérimentalement car un grand nombre de points durs demeurent (stra-

tégies d'immobilisation des objets sur électrode, taille, coût d'isolement et de purification des objets biologiques, stabilité et activité). Les techniques électrochimiques couplées permettent toutefois de mesurer localement les concentrations d'espèces électroactives produites par ces objets lorsqu'ils sont soumis à des stimuli physiques ou chimiques et cette thématique devrait donc générer de grandes avancées scientifiques dans les années à venir. En (électro)catalyse, la relation structure-activité catalytique est essentielle et devient primordiale lorsque la taille des catalyseurs diminue. Néanmoins, l'étude de particules de taille nanométrique est à ce jour limitée expérimentalement (caractérisation *in situ* de clusters comportant un nombre d'atomes restreint) et théoriquement (état structural des clusters, énergies de liaison des adsorbats et des molécules de solvant). Un effort conjugué des expérimentateurs et des théoriciens devrait permettre de comprendre puis de prédire comment la taille de nano-objets influence les processus électrochimiques, notamment dans le domaine de la catalyse et de l'énergie. À plus long terme, il devient important de prendre en compte l'aspect environnemental dans le choix des matériaux d'électrode et des électrolytes futurs, notamment en envisageant leur recyclage ultérieur.

## Capteurs et biocapteurs électrochimiques

Le domaine des capteurs et biocapteurs connaît un véritable foisonnement et les recherches sont portées à la fois par les laboratoires des sections 13 et 14. Il s'agit d'un secteur typiquement interdisciplinaire où l'électrochimie interfaciale, les fonctionnalisations de surface, la chimie organométallique se combinent à la physique (optique, microfabrication) ou à la biologie et au biomédical. Les capteurs électrochimiques opèrent dans les milieux liquides et gazeux de manière continue. Ils peuvent être classés selon leur mode de transduction : potentiométrique, ampérométrique ou impédancemétrique pour la détection électrochimique proprement dite,

gravimétrique dans le cas de la microbalance à quartz. Leur succès vient de la simplicité du mode de fonctionnement avec des limites de détection et des temps de réponse remarquables. La détection d'espèces ioniques ou biologiques est possible et fait appel à des mécanismes d'interaction spécifiques où la reconnaissance moléculaire peut être d'origine chélatante ou catalytique (hybridations anti-gène-anticorps, ADN). Le développement de ces capteurs est aussi porté par l'émergence des nouveaux matériaux d'électrode que sont les électrodes de diamant dopé au bore ou les nombreux matériaux carbonés amorphes contenant différents éléments de substitution du carbone avec des taux de  $sp^2/sp^3$  modulables et qui offrent dans ce domaine des possibilités de surface fonctionnalisables parfois supérieures à l'or. Il est enfin à noter que l'électrochimie permet l'intégration de couches actives électrodéposées sur des micro et nano-électrodes élaborées grâce aux progrès de la microfabrication, notamment sur silicium, au sein de grandes centrales de technologies. Les atouts de ces capteurs chimiques, combinant électrochimie et microtechnologies, sont la possibilité de production de masse de capteurs chimiques à faible coût, leur simplicité d'utilisation, leurs faibles dimensions et leur caractère générique.

## Corrosion/Protection

L'électrochimie des surfaces et la corrosion constituent une thématique forte du domaine de l'électrochimie. La corrosion, et plus spécifiquement la corrosion localisée, est un domaine où les évolutions en cours de l'électrochimie (sondes locales, nanoélectrochimie) identifieront les mécanismes multi-échelles mis en jeu. En plus de la résolution temporelle, c'est l'évolution vers une maîtrise de la résolution spatiale qui devrait permettre à la communauté des corrosionnistes de progresser avec la communauté des électrochimistes et de resserrer leur cohésion sous une thématique structurante comme celle de la nanocorrosion.

Les mesures électrochimiques réalisées sur des surfaces métalliques monocristallines

permettent de déterminer la relation entre la structure de la surface à l'échelle atomique, et son comportement électrochimique : phénomènes de polarisation (nano-condensateurs, potentiel de charge nulle), adsorption d'hydroxyles...

Le phénomène de polarisation électrochimique qui se produit à une interface chargée métal solution constitue l'étape initiale de tous les processus électrochimiques : orientation dipolaire du solvant, adsorption spécifique des ions, réactions faradiques, migration et diffusion des ions. La modélisation de la couche double électrochimique résultant de ce phénomène de polarisation nécessite d'étudier, dans une première étape, le système le plus simple où l'interface est idéalement polarisée c'est-à-dire qu'elle n'est le siège d'aucune réaction faradique et qu'elle se comporte comme un simple condensateur électrochimique. Dans le cas des métaux solides, l'interface la plus simple à étudier est celle formée par une face monocristalline d'un métal noble, tel que l'or par exemple, au contact d'une solution aqueuse d'un électrolyte indifférent.

L'une des originalités des recherches effectuées sur le thème de la corrosion et de la passivation des métaux et alliages réside dans l'approche des phénomènes de corrosion des films passifs à l'échelle atomique ou moléculaire, et la réalisation de la jonction entre la compréhension des mécanismes à cette échelle et les manifestations macroscopiques de la corrosion.

Les recherches fondamentales ont pour objectif d'appréhender, à une échelle très localisée, les facteurs structuraux qui régissent la croissance et les propriétés de protection contre la corrosion des films passifs ainsi que leur dégradation. La caractérisation par microscopie STM *in situ*, sous contrôle du potentiel électrochimique, de la croissance et de la structure de films passifs formés sur métaux purs, ou l'étude structurale des premiers stades de rupture de passivité en milieu chloruré sont des exemples de telles recherches.

La progression dans la maîtrise de la compréhension des interfaces complexes et hété-

rogènes sera aussi toujours source d'études croisées. Du point de vue de la durabilité des matériaux métallique et donc de la protection contre la corrosion, les recherches sur les revêtements qui en constituent l'une des voies les plus exploitées dans le milieu industriel, se focalisent actuellement sur des aspects environnementaux par le remplacement de revêtements efficaces mais nuisibles à l'environnement comme les chromates par des substitués non polluants.

Le domaine de l'énergie nucléaire, représente un champ d'investigation où la simulation des processus électrochimiques mis en jeu au cours de scénari de corrosion conditionnera le choix des matériaux pour stocker les déchets nucléaires.

Les travaux en biocorrosion atteignent actuellement un stade de maturité par une réelle synergie entre les équipes d'électrochimistes, de physico-chimistes et de biologistes et font émerger ce secteur comme une discipline à part entière. Les biofilms sont ubiquitaires : ils colonisent les sols, les rivières, les végétaux et les organismes vivants supérieurs. Dans de nombreux cas, ils ont des effets positifs et même vitaux : biofilms physiologiques impliqués dans la colonisation du tractus intestinal ou de la surface des racines et des feuilles de plantes, agents géochimiques agissant dans la formation ou l'altération des minéraux...

En contrepartie, ils sont de plus en plus souvent identifiés comme la source de lourds problèmes industriels et sociétaux : dégradation des installations portuaires, formation de bio-salissures sur les coques de navires, accélération de phénomènes de corrosion, contamination des équipements des industries agroalimentaires et des réseaux de distribution d'eau potable... Les biofilms formés sur les parois des réseaux d'eau chaude et de conditionnement d'air sont le lieu privilégié d'accumulation d'espèces pathogènes (*Legionella*, amibes...) qui peuvent ensuite contaminer l'environnement. En milieu hospitalier, la colonisation de la surface des implants, des cathéters ou des salles d'intervention est à l'origine d'environ 60 % des infections nosocomiales.

Déchiffrer la complexité des biofilms pour répondre aux interrogations de plus en plus pressantes de la société et des acteurs industriels, offrir des solutions aux questions d'hygiène publique, diminuer le coût des biodégradations, sont des défis et exigent de développer une « microbiologie des surfaces » en croisant les compétences de très nombreux domaines complémentaires : biologie et microbiologie, chimie des solutions et physico-chimie des surfaces, géologie et hydrologie, sciences des matériaux, hydrodynamique et ingénierie... Pour relever ce défi, la structure du PNIR « Biofilms » (Pôle National à Implantation Régionale) a eu jusqu'en 2009 pour effet de fédérer au plan national des équipes de recherche multidisciplinaire du CNRS impliquées dans la thématique, de mutualiser les savoirs et les moyens, et de capitaliser les acquis sur le long terme. Une telle initiative, fructueuse pour la recherche, doit être soutenue par le CNRS et renouvelée. L'impact industriel de ces recherches est très fort, en amont, les travaux sur la compréhension des interactions entre une protéine et un métal susceptible de s'activer, par exemple, sous l'effet des enzymes tels que les hydrogénases offrent un cadre conceptuel particulièrement fécond.

## Électrochimie des solides

L'électrochimie des solides a encore vu son importance tout récemment s'accroître du fait des enjeux présentés par les systèmes de stockage et de conversion de l'énergie d'une part et par les systèmes embarqués. Suite à la prise de conscience des problèmes liés au réchauffement de la planète, la pile à combustible est apparue comme une alternative crédible aux énergies fossiles. Les liens avec la communauté des matériaux s'avèrent cruciaux et supposent une coopération étroite dans des actions interdisciplinaires, comme condition sine qua non d'optimisation notamment du point de vue des mécanismes d'activation et des processus de transport dans les générateurs industriels. En effet, les chimistes du solide doivent travailler en collaboration étroite avec les électrochimistes afin de mieux

comprendre les mécanismes électriques et électrochimiques en lien direct avec la synthèse et la mise en forme des matériaux, le contrôle de leur microstructure et leur structure cristallographique.

Les recherches dans le domaine du stockage s'imposent comme indispensables en particulier dans le domaine des sources intermittentes d'électricité ou de l'énergie embarquée pour les transports. Se posent les problèmes généraux des choix technico-économiques, du dimensionnement, de l'optimisation des emplacements et du cyclage. Sont attendus en particulier des développements sur les supercapacités ainsi que sur l'augmentation de la densité massique/volumique des capacités.

Pour le stockage électrochimique, les enjeux consistent :

- à optimiser les matériaux existants, voire à trouver de nouveaux matériaux (anodes, cathodes, électrolytes, connecteurs...), autorisant des densités et des flux énergétiques accrus,

- à améliorer la cyclabilité en diminuant les phénomènes irréversibles d'exfoliation lors du processus d'insertion/désinsertion du lithium dans les électrodes à base de carbone ou d'oxydes,

- à développer des modèles d'état de charge incluant le vieillissement du système ; aujourd'hui l'imprécision des modèles disponibles conduit à de graves erreurs de conception (coût et durée de vie) des systèmes utilisant ce mode de stockage,

- à développer une métrologie avancée adaptée et des stratégies d'équilibrage et de gestion de l'énergie

Les intérêts principaux de la pile à combustible à oxydes solides (SOFC) résident dans l'obtention d'une puissance élevée et d'un rendement proche de 60 % en génération d'électricité. De plus, leur application en cogénération, c'est-à-dire en production simultanée de fluide chaud et d'électricité, représente un enjeu industriel important.

Actuellement, de nombreuses recherches sont axées sur l'abaissement de la température de fonctionnement des SOFCs depuis 1 000 °C jusqu'à 700 °C pour en autoriser l'industrialisation (IT-SOFC). Un des intérêts primordiaux d'un abaissement de la température réside dans l'utilisation de matériaux d'interconnexion, de scellement et de raccords céramique-métal à base d'acier, de verre ou de polymère, qui présentent des coûts moindres par rapport à ceux employés actuellement. De plus, cette température plus faible permet d'accroître la durée de vie et de diminuer la réactivité des différents composants de la pile. *Diminuer la température de fonctionnement de la pile aux alentours de 700° C pour en augmenter la durée de vie pose alors le problème de la chute ohmique à travers l'électrolyte et de l'augmentation des surtensions aux électrodes.*

Afin de minimiser la chute ohmique à travers l'électrolyte, deux axes de recherche sont actuellement développés. Le premier vise à mettre au point de nouveaux électrolytes de conductivité ionique accrue (conducteurs anioniques ou protoniques) et le second a pour objectif de diminuer l'épaisseur de l'électrolyte sous forme de film mince pour limiter sa résistance ohmique.

La zircone cubique appelée zircone yttriée stabilisée (YSZ) est l'électrolyte le plus communément utilisé dans les SOFC. Ce matériau est le seul pour lequel une bonne stabilité chimique et électrochimique, une bonne conductivité à haute température et un nombre de transport ionique supérieur à 99% ont été confirmés. À plus basse température, la conductivité de YSZ devient plus faible que les électrolytes à base de cérine dopée ou les molybdates de lanthane dopés (LAMOx) ou les gallates de lanthane dopés au strontium et magnésium (LSGM), ces derniers étant des matériaux moins stables chimiquement que YSZ dans une atmosphère réductrice. Ces dernières années, l'évolution de la conductivité ionique de la zircone yttriée a été étudiée en fonction de nombreux paramètres tels que la nature, la taille et la concentration du ou des dopants, la nature et le taux d'impuretés, la structure locale, la microstructure (taille des

grains, joints de grains, porosité, dislocations), les procédés de synthèse. Pour augmenter la conductivité de l'ion  $O^{2-}$  dans les matériaux de membrane, enjeu essentiel des gains en rendement thermodynamique global, des espoirs ont été récemment fondés sur une nouvelle approche par le choix de dimensions nanométriques en volume, comme par exemple les nanopoudres de zircone. En fait, il existe actuellement de nombreuses controverses dans la littérature concernant cette augmentation de la conductivité des zircons caractérisées par des tailles de grains nanométriques comparativement aux microniques. Récemment, il est apparu que la diminution de la taille des grains vers des dimensions submicroniques induise des comportements électriques inédits dus aux effets d'interfaces. De plus, la déstabilisation de la forme quadratique de la zircone dopée à grains nanométriques a été fortement évitée sous vapeur d'eau après 1 000 h. Aujourd'hui, il est donc très important d'étudier l'impact de cette nanostructure sur les propriétés électriques de ces matériaux céramiques que ce soit sous forme de bulk ou de couches minces.

L'attention se porte aussi dans ce domaine sur des matériaux à conduction protonique améliorée qui offriraient une conductivité ionique de l'électrolyte solide voisine des matériaux à conduction par  $O_2^-$  mais à des températures plus basses (400-600 °C) permettant de concevoir des piles tout solide, les PCFC (Proton Ceramic Fuel Cell). Citons les silicates de structure de type apatite, la famille des pérovskites dérivés de  $Ba_2In_2O_5$ . La membrane protonique doit être stable mécaniquement, chimiquement et thermiquement et sa durée de vie doit être suffisante, c'est à dire compatible avec l'application visée (e.g. 5 000 h pour le transport).

La diminution des surtensions aux électrodes et particulièrement à la cathode passe par l'étude de nouveaux matériaux à conduction mixte, électronique et ionique (MIEC). Le but est de diminuer la surtension cathodique de l'électrode en facilitant l'accès des gaz et en maximisant le nombre de sites réactionnels. Après avoir développé récemment de nouveaux matériaux performants tels que les

ferro-cobaltites ou les nickelates de lanthane par exemple, une maîtrise de la mise en forme des éléments en couches minces ou épaisses, denses ou poreuses s'avère maintenant nécessaire. Des études d'optimisation de la microstructure des électrodes sont menées visant à la réalisation de gradients de porosité et de composition. La microstructure, le coefficient d'expansion thermique, les conductivités électronique et ionique puis la réactivité et les surtensions à l'interface entre l'électrolyte et la cathode restent des paramètres fondamentaux à étudier. L'étape suivante sera d'incorporer ces matériaux dans des stacks et de tester leur durabilité.

Les SOFC permettent l'utilisation de combustibles moins nobles que l'hydrogène pur, comme le méthane ou le propane, voire des mélanges issus de la biomasse. Les phénomènes d'empoisonnement, bien que moins cruciaux, restent à étudier. Enfin, l'électrochimie des solides, en particulier des céramiques, est impliquée dans l'élaboration de capteurs pour les applications environnementales et agro-alimentaires.

### 3.5 CONCLUSION

La science des surfaces et des interfaces est une discipline en évolution. Les origines en sont multiples. La première d'entre elles résulte des besoins de recherche liés aux défis énergétiques, aux besoins grandissants des secteurs

de la santé, aux évolutions du secteur de l'électronique et des capteurs, au problème majeur de la maîtrise de la qualité de l'eau et plus généralement à la problématique du développement durable et de la préservation de l'environnement. Sur tous ces points la science des surfaces et des interfaces apporte des contributions importantes aux avancées scientifiques et propose des solutions alternatives crédibles. Si l'on prend par exemple le secteur sensible de l'énergie, l'électrochimie a traduit cette demande par des avancées, tant dans les concepts que dans les réalisations industrielles, dans les domaines des piles et batteries, des piles à combustibles, dans les développements d'électrolytes spécifiques, de membranes sélectives, dans l'explosion des travaux autour de l'étude des propriétés électrochimiques d'objets nanoscopiques, pris seuls ou dans un environnement, déterminante pour la mise en œuvre d'électrodes complexes.

L'essentiel des progrès réalisés vient des percées, dans les domaines des techniques de caractérisation de surfaces *in situ* et en particulier des microscopies à champ proche, et de la maîtrise de l'élaboration de multi-couches ultra-minces ou de nanoobjets supportés sur des surfaces. Sur tous ces points les physico-chimistes de la réactivité aux interfaces ont apporté des réponses et des démarches spécifiques qui ont enrichi immédiatement ces champs disciplinaires réalisant ainsi un bel exemple d'interdisciplinarité ; même restreinte en nombre, la communauté scientifique française est très présente dans cette évolution majeure.

# 15

## CHIMIE DES MATÉRIAUX, NANOMATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

*Président de la section*

Claude DELMAS

*Membres de la section*

Francis ABRAHAM

Thierry BATAILLE

Emmanuel BAUDRIN

Grégory BERTHOME

Jean-Marie DUBOIS

Abdeslam EL MANSSOURI

Fabien GRASSET

Pascal GRESSIER

Christian GUIZARD

Alain HAZOTTE

Marie-France JOUBERT

Philippe LEONE

Antoine MAIGNAN

Francis MAURY

Jean-Luc REHSPRINGER

Vincent ROUESSAC

Philippe THOMAS

Matias VELAZQUEZ

Emmanuel VERON

Cathie VIX

### INTRODUCTION

La Section 15 rassemble une communauté de 333 chercheurs CNRS rattachés pour la plupart à des unités appartenant à l'Institut de Chimie (INC), mais également aux divers autres Instituts (INP, INSIS, INSU, INEE et INSB). Dans les laboratoires dépendant de la Section 15, où l'on trouve également 700 enseignants-chercheurs, les recherches développées portent sur la chimie des matériaux, des nanomatériaux et sur les procédés. Il s'agit tout à la fois de **créer de nouveaux matériaux** et d'étudier l'ensemble de leurs propriétés afin de produire de la connaissance qui sera le terreau des applications du futur, mais aussi de **proposer des matériaux pour** les innovations d'aujourd'hui et de demain. Ces recherches tout aussi fondamentales imposent d'orienter les choix vers des matériaux répondant à des cahiers des charges précis, définis par les propriétés d'usage et des niveaux de performances qui ouvriront la voie à des applications réelles. Dans ce contexte, la thématique «génie des procédés», composante forte de l'activité des chercheurs de la Section 15, joue un rôle essentiel. Les activités de la Section 15 ont toujours été marquées par de fortes relations avec le monde socio-économique et notamment industriel.

Les recherches, historiquement basées sur la chimie du solide et la métallurgie, sont

devenues très multi-disciplinaires et sont réalisées en collaboration avec les autres Instituts du CNRS. Les évolutions récentes concernent les matériaux hybrides et bio-inspirés, les nanomatériaux, les problèmes de mise en forme et de structuration multi-échelles, le développement de nouveaux procédés. Dans tous les cas, la modélisation et la simulation jouent un rôle essentiel.

Dans cette présentation, afin de mettre en évidence les aspects sociétaux de nos recherches, les activités ont été déclinées en montrant l'implication des matériaux dans les grands domaines que sont l'énergie, l'environnement, l'habitat, les technologies de l'information et de la communication, les matériaux de structure et la santé. D'autres secteurs comme les transports ne sont pas ignorés via les problématiques transverses énergie et allègement de structures. Toutes ces recherches s'appuient sur la création de nouveaux matériaux qui nécessite d'ouvrir de nouvelles voies de synthèse, de caractérisation et de mise en œuvre de procédés.

## **PARTIE 1 – CRÉATION DE MATÉRIAUX : DE LA SYNTHÈSE AU PROCÉDÉ**

### **1.1 SYNTHÈSE**

Créer de nouveaux matériaux, déterminer leur structure, étudier et optimiser leurs propriétés constituent le fondement de l'activité du chimiste. Dans le cas de la chimie du solide et de la métallurgie, cette approche est complétée par la science et l'ingénierie des matériaux qui permet de passer du matériau « idéal », c'est-à-dire présentant des propriétés de base optimales, au matériau réel présentant des propriétés macroscopiques utilisables pour un usage spécifique et résultant des changements d'échelle, des comportements multi-

fonctionnels (couplages multiphysiques) et de la prise en compte de la durabilité. La créativité peut conduire à de nouvelles formules chimiques, de nouvelles structures, de nouvelles textures qui, ensemble, permettent l'émergence de nouvelles propriétés et leurs modulations.

Ces nouveaux matériaux peuvent être métalliques, inorganiques ou hybrides organique/inorganique. Ils peuvent être parfaitement ordonnés (du monocristal à la nanoparticule monocristalline), désordonnés (vitreux ou amorphes), aperiodiques, poreux, polyphasés (du composite à la vitrocéramique, des aciers aux alliages métalliques), (nanostructurés, micro- ou nano-particules, cœur-écorce, framboises, Janus, fibres cœur-gaine, etc.) ou fonctionnalisés. Leur morphologie va du nano-objet au matériau massif en passant par les systèmes pulvérulents, les films minces, les fibres et les cristaux à morphologie contrôlée.

Si certaines applications nécessitent l'élaboration de matériaux monophasés de grande pureté, une partie de plus en plus importante des systèmes réels utilise des matériaux polyphasés ou des assemblages de matériaux. Dans ce dernier cas, la maîtrise des interfaces joue un rôle considérable en créant de nouvelles propriétés ou en permettant de maîtriser la durée de vie des systèmes dans des conditions d'utilisation qui, dans certains cas, sont extrêmement contraignantes (agressivité chimique et conditions extrêmes).

La créativité concerne également la découverte de nouvelles voies de synthèse (chimie douce, lego chimique, milieu supercritique, etc.) qui permettent, en conduisant à des structures (ou des textures) métastables, d'ouvrir considérablement le champ des matériaux imaginables.

Toutes les propriétés présentées ci-dessus sont conditionnées par la nature des liaisons chimiques qui sont créées lors de la synthèse et de la mise en forme des matériaux. Pour le chimiste du solide la problématique peut paraître très simple : il suffit de jouer avec la stabilité intrinsèque des liaisons chimiques dans les conditions de synthèse et

d'utilisation des matériaux, mais également avec la compétition entre les diverses liaisons. Elle est en fait extrêmement compliquée étant donné le nombre considérable de paramètres mis en jeu.

Les diverses techniques de modélisation et de simulation jouent un rôle de plus en plus important pour guider le chimiste dans la conception des matériaux. En particulier, le développement et l'utilisation des méthodes de calculs de chimie quantique (type théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)) ou d'autres méthodes à l'échelle microscopique (dynamique moléculaire, etc.) devront être généralisés.

En ce qui concerne la synthèse des matériaux outre les voies classiques de la chimie du solide, il est crucial de donner une place importante à toutes les techniques de type chimie douce qui peuvent conduire à l'obtention de matériaux métastables susceptibles de présenter des propriétés physiques intéressantes.

On peut citer de façon non exhaustive :

- la synthèse en milieu micro-onde,
- le frittage flash utilisé comme voie de synthèse,
- l'intercalation électrochimique qui permet de moduler les compositions de façon continue et de fixer le niveau de Fermi,
- toutes les techniques d'élaboration de couches minces,
- la synthèse colloïdale,
- la fonctionnalisation de particules,
- l'utilisation des milieux supercritiques et leur généralisation à la microfluidique,
- la généralisation des méthodes biomimétiques.

Si l'étude des « nano » devra être poursuivie, notamment pour leurs propriétés spécifiques, il est important de continuer à étudier toutes les classes de matériaux et en particulier les monocristaux massifs, présentant des taux de défauts contrôlés, qui jouent un rôle stratégique dans de nombreux domaines industriels.

Un effort devra également être poursuivi pour optimiser l'élaboration « bottom-up » de films minces et les techniques de dépôt afin d'améliorer l'homogénéité des couches et la qualité des revêtements. Ces matériaux particulièrement sophistiqués, pouvant être utilisés dans des conditions réelles très éloignées du domaine classique, jouent un rôle essentiel dans la durée de vie des systèmes.

Il faudra également considérer l'élaboration des nouvelles membranes qui prennent une importance croissante dans le traitement du gaz, la production d'énergie, la médecine régénératrice et dans divers procédés industriels (papier, pétrochimie, textile, chimie et biotechnologie).

## 1.2 CARACTÉRISATIONS STRUCTURALE, CHIMIQUE ET PHYSIQUE

La diffraction des rayons X est l'outil de base du chimiste du solide. La généralisation de la méthode Rietveld, associée aux performances des nouveaux diffractomètres permettant de résoudre les structures sur poudre avec une excellente précision, est devenue un outil courant dans tous les laboratoires. L'évolution actuelle concerne le développement d'analyses *in situ* permettant de remonter aux processus de formation des matériaux. L'association avec la diffraction neutronique permet d'avoir une excellente caractérisation structurale à longue distance. Le couplage avec d'autres techniques, donnant des informations plus locales, telles que la microscopie électronique, la RMN du solide, l'absorption X, l'XPS, la spectroscopie Mössbauer et la spectroscopie Raman, permet d'accéder à une connaissance multi-échelles des matériaux.

Les caractérisations multi-échelles des matériaux (chimiques et texturales) sont également accessibles en associant de nombreuses autres techniques (spectroscopies Auger, Castaing, TOF-SIMS, NanoSIMS, GD-OES, FIB, microscopies de champ proche).

L'utilisation des grands instruments (rayonnement synchrotron, neutrons), pour lesquels l'ensemble des laboratoires relevant de la Section 15 est désormais sensibilisé, a joué un rôle essentiel. L'ouverture, dans les années à venir, de toutes les lignes du synchrotron de 3<sup>e</sup> génération SOLEIL offrira de nouvelles perspectives d'analyses en chimie des matériaux. La résolution structurale des matériaux, principale caractérisation de la matière cristalline généralement réalisée en amont des applications, peut désormais être abordée de manière plus précise, comme le montre l'essor de la cristallographie des macles, des structures modulées et incommensurables, des composés ainsi que des matériaux polycristallins. Un second aspect associé à la puissance des flux et la faible divergence des faisceaux de lumière est la micro-analyse et l'imagerie à l'échelle micro- ou sub-micrométrique, ainsi que le suivi des cinétiques de transformations ou de la dynamique de réseau.

L'opportunité de réaliser des mesures optiques éventuellement couplées et/ou *in situ* permet également d'enrichir considérablement le front des connaissances de la structure des matériaux étudiés. On citera notamment les méthodes spectroscopiques réalisées avec différentes sources spectrales depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X et également l'utilisation de sondes locales telles que la RMN du solide qui connaît un essor considérable grâce, entre autres, à l'existence récente de la «TGE décentralisée RMN Très Hauts Champs».

Dans le même esprit, il faut noter la création récente par le CNRS, avec le soutien du Ministère et du CEA, du réseau de plateformes de haut niveau de microscopie électronique à transmission et sonde atomique (METSAs). Ce réseau fonctionne comme un grand instrument (propositions d'expériences, comité de programme). Les progrès techniques récents sont très utiles pour étudier les structures et compositions des nouveaux matériaux et nanomatériaux : HREM corrigée, tomographie, EELS, HAADF-STEMZ, cristallographie aux électrons, TEM *in situ*, etc. La tomographie permet de réaliser de l'imagerie 3D à différentes échelles selon qu'elle est X ou électronique.

Un grand nombre d'unités de recherche de la Section 15 possède et développe des techniques de caractérisation des propriétés physiques (électroniques, magnétiques, optiques, thermiques) qui permettent, en complément aux déterminations structurales, une excellente caractérisation des matériaux. Il est indispensable de favoriser cette pluridisciplinarité chimie/physique au sein des unités de recherche, source de créativité et d'innovation indiscutable.

### 1.3 PROCÉDÉS

Les matériaux sont soit utilisés en tant que tels pour leurs propriétés fonctionnelles et structurales, soit comme constituants d'un composant ou système générant la propriété d'usage visée.

Dans le premier cas, les nouveaux matériaux, qu'ils soient pulvérulents ou massifs, ne confirment leur grand intérêt que s'ils présentent les caractéristiques et performances attendues lorsqu'ils sont produits à grande échelle. Les procédés d'élaboration pour une production de masse sont un point clé du développement de ces nouveaux matériaux quelle que soit leur nature (céramique, métallique). Les compétences existant en Section 15 permettent, au-delà des stratégies de synthèse, d'intégrer les aspects « procédés » dans la sélection des matériaux et la démarche scientifique en interaction étroite avec des Sections plus axées sur le génie des procédés. Le passage au stade pilote ou semi-pilote requiert des études spécifiques pour une meilleure compréhension des processus fondamentaux, de la simulation et du diagnostic *in situ* à différentes échelles. Plusieurs succès dans le domaine des nanomatériaux (NTC), des céramiques et de la métallurgie sont issus de travaux de la Section 15. L'étude des relations procédé-micro-structure-propriétés sous-tend la plupart des travaux.

Si la création de nouveaux matériaux est un axe fort de la Section, pour de nombreux

matériaux déjà connus grâce à leur propriété de base, c'est le développement de leurs procédés d'élaboration, de transformation, de mise en forme et d'assemblage qui est en plein essor. Au sein de cette activité pluridisciplinaire, où science fondamentale et innovation technologique se rejoignent, divers procédés par voie humide ou voie sèche sont étudiés et développés. Ils permettent la fabrication de films ou de pièces massives. Citons par exemple le frittage flash assisté plasma, laser ou micro-ondes, la stéréolithographie, l'impression 3D, etc.

Pour les matériaux constitutifs d'un ensemble (nanomatériaux intégrés dans un composant, couches minces fonctionnalisant une surface, hétérostructure complexe, etc.), les procédés d'élaboration à l'échelle du laboratoire doivent déjà préfigurer l'échelle pilote. Les conditions locales variant généralement en différents points d'un réacteur, leur contrôle est indispensable pour uniformiser les micro- ou nanostructures et donc optimiser les propriétés. Les paramètres d'un procédé d'élaboration sont particulièrement nombreux et souvent couplés entre eux. L'étude de leur influence nécessite une expérimentation importante et onéreuse. La simulation et la modélisation, ainsi que les méthodes combinatoires sont des aides précieuses de plus en plus mises en pratique.

Si l'importance des procédés a été soulignée pour faire déboucher un nouveau matériau, l'activité croissante dans ce domaine est aussi tirée par une demande sociétale forte de respect de l'environnement et de développement durable. Que ce soit des procédés originaux pour ces nouveaux matériaux ou des procédés alternatifs, par exemple pour pallier à la toxicité des métaux lourds, ils doivent être propres (sans solvant), performants en terme de rendement et avoir un coût énergétique limité (basse température par exemple). Le chimiste doit intégrer ces exigences dans sa stratégie et sa créativité.

## **PARTIE 2 – MATÉRIAUX ET ENJEUX SOCIÉTAUX**

### **2.1 MATÉRIAUX POUR L'ÉNERGIE ET L'ENVIRONNEMENT**

La maîtrise de l'énergie rendue indispensable par la diminution des réserves en énergies fossiles, associée aux problèmes de réchauffement climatique résultant des émissions de CO<sub>2</sub>, implique de développer une utilisation plus raisonnée des sources actuelles tout en préservant l'environnement. Il s'agit de réduire la consommation dans tous les secteurs en développant de nouvelles techniques de production, de conversion et de stockage. Dans ce contexte, les matériaux sont appelés à jouer un rôle considérable. En effet, sous de nombreux aspects, les matériaux sont au cœur du développement des nouvelles technologies et de l'amélioration des performances des procédés existants, tant au niveau de la collecte, du stockage que de la conversion de l'énergie. Il s'agit donc d'un domaine particulièrement vaste couvert en grande partie par des chercheurs de la Section 15.

#### **Matériaux pour la conversion de l'énergie**

L'activité de la Section 15 étant essentiellement focalisée sur les problématiques matériaux et procédés, la présentation qui suit n'a pas la prétention de couvrir tous les problèmes relatifs à la conversion de l'énergie.

#### **Photovoltaïque**

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique représente une voie très prometteuse et riche. Basée sur les technologies du silicium largement développées grâce à l'industrie de l'électronique, il est nécessaire de développer de nouvelles technologies de production de silicium à bas coûts. Les systè-

mes photovoltaïques évoluent vers des systèmes multicouches minces inorganiques et des systèmes purement organiques à base de polymères conducteurs qui ouvrent la voie à d'autres applications. La voie « cellule de Grätzel » reste également une voie très prometteuse malgré les rendements plus faibles que les cellules au silicium en raison de la possibilité de contrôler indépendamment les différents processus de séparation et de collecte des charges sous radiation. Il convient ainsi de développer par une recherche pluridisciplinaire de nouveaux chromophores permettant d'absorber plus efficacement la lumière mais également d'optimiser le support inorganique (nature, porosité, microstructure, etc.).

### **Piles à combustibles**

L'intérêt essentiel des piles à combustible résulte du très bon rendement de conversion. Deux sortes de piles à combustible (PAC), les PEMFCs fonctionnant à basse température (60-120 °C) et les SOFCs fonctionnant à haute température (700-1 000 °C) font l'objet de recherches très importantes au niveau national, européen et international. De nombreux problèmes restent à résoudre avant l'industrialisation et la commercialisation de ces deux types de piles les plus couramment envisagés. Outre le coût de la plupart des matériaux utilisés (membranes, catalyseurs, céramiques, matériaux d'interconnexion, etc.), de nouveaux composants du cœur de pile ayant des propriétés spécifiques améliorées sont à développer et de nouveaux concepts de gestion des fluides, de la chaleur et des flux d'énergie sont à mettre en œuvre.

Les chercheurs de la Section 15 sont particulièrement concernés par les membranes et par l'optimisation des SOFCs. Il s'agit d'associer la chimie du solide à la science et à l'ingénierie des matériaux. Dans le cas des SOFCs, l'objectif essentiel est la diminution de la température de fonctionnement (autour de 600 °C) afin d'améliorer la durée de vie des systèmes. Les efforts de recherche concernent la découverte de nouveaux électrolytes oxydes, de nouveaux matériaux de cathode (oxydes à conductivité mixte).

Du côté de l'anode, des catalyseurs permettant le reformage interne du combustible (gaz naturel, hydrocarbures) sont à développer.

Par ailleurs, dans le nouveau concept de Piles Céramiques à Conduction Protonique (PCFC), qui permettrait d'abaisser la température de fonctionnement vers 400-600 °C, la synthèse et la mise en forme de nouveaux matériaux (électrolytes, électrodes, interconnecteurs) constituent une nécessité avant tout développement technologique.

La production de l'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température est considérée comme particulièrement intéressante dans le cadre du développement du vecteur hydrogène ; dans ce contexte, la similitude des systèmes pile à combustible et électrolyseur de la vapeur d'eau, ouvre de nouvelles voies de recherche concernant la mise au point de matériaux d'électrodes pour l'électrolyse à haute température.

### **Thermoélectriques**

Les matériaux susceptibles de transformer réversiblement l'énergie thermique en électricité ont deux applications essentielles : production d'électricité au moyen de générateurs thermoélectriques à partir de la chaleur perdue (70 % de l'énergie consommée par un véhicule est rejetée sous forme de chaleur) et production directe de froid par effet Peltier.

Deux voies sont prometteuses : (i) améliorer les performances des meilleurs matériaux du moment au moyen de la nanostructuration, (ii) découvrir de nouveaux matériaux plus performants ou permettant de récupérer de la chaleur à des températures (le côté chaud pouvant atteindre 1000 °C) jusqu'alors inaccessibles avec les matériaux usuels tels que  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . C'est donc sur ce sujet très interdisciplinaire chimie-physique-ingénierie que les chercheurs se sont fédérés dans le GDR « Thermoélectricité ».

La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques performants oblige le chimiste du solide à jongler avec les lois de la physique puisque sont recherchés un grand coefficient Seebeck et une faible résistivité

électrique, deux propriétés *a priori* incompatibles. Des propriétés acceptables sont obtenues avec des semiconducteurs dégénérés ou bien des matériaux à fortes corrélations électroniques. Les principales avancées ont été réalisées avec des skutterudites, des siliciures, des antimoniures, des phases de Zintl, des alliages dans lesquels la décomposition spinodale est utilisée pour créer des interfaces jouant le rôle de barrière à phonons et aussi des oxydes lamellaires, des oxydes conducteurs dérivés des TCO's obtenus par dopage. Parmi les nouveaux matériaux prometteurs, on peut citer les composés dérivés de  $Mg_2Si$  et les travaux sur les systèmes composites dans lesquels grâce à l'utilisation de procédés de synthèse innovants pour contrôler la microstructure (SPS), les nano-inclusions réduisent la propagation des phonons et donc la conductivité thermique. De nouveaux champs de recherche s'ouvrent devant les chercheurs (chimistes et métallurgistes) pour imaginer de nouveaux matériaux.

### **Magnétocaloriques**

L'effet magnétocalorique (EMC), qui se traduit par l'échauffement ou le refroidissement d'un solide sous l'action d'un champ magnétique, fonctionne comme une machine thermique. Cet effet, utilisé pour atteindre de très basses températures, peut être exploité pour la réfrigération autour de la température ambiante via le développement de matériaux à EMC géant dans lesquels la transition magnétique est associée à une transition structurale. La réfrigération magnétique peut offrir une alternative moins énergivore et plus écologique aux systèmes thermiques classiques en raison d'une plus grande efficacité thermodynamique et de l'absence de polluant atmosphérique. Le développement de nouveaux systèmes nécessite la recherche de nouveaux matériaux.

### **Matériaux pour le stockage de l'énergie**

La disparition prévisible des énergies fossiles impose le développement de la produc-

tion d'électricité à partir de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables. Le vecteur « électricité » n'étant pas facilement stockable, il est impératif de stocker à diverses échelles de temps la production et également de produire un lissage dans le cas des énergies d'origine éolienne et photovoltaïque qui peuvent présenter des variations extrêmement brusques. Les batteries sont considérées aujourd'hui comme un moyen réaliste de stockage de l'énergie électrique à très grande échelle. Dans le cas des véhicules électriques et hybrides, elles permettront via une optimisation du système de motorisation et de la récupération d'énergie au freinage de diminuer fortement la consommation d'énergie fossile. Par ailleurs, la généralisation de la traction électrique contribuera à délocaliser le stockage de l'électricité et permettra ainsi d'harmoniser la production et la consommation. Dans le cas des véhicules électriques et hybrides et des applications demandant une forte puissance, les supercondensateurs seront aussi amenés à jouer un rôle important.

Les chercheurs de la Section 15 sont fortement impliqués dans le développement de nouveaux matériaux d'électrodes structurés ou texturés aux différentes échelles associés à des méthodes innovantes de conception d'électrodes nanoarchitecturées multifonctionnelles permettant d'améliorer les performances et la longévité de ces systèmes. Dans le cas des systèmes au lithium qui, de nos jours, concentrent l'essentiel de l'activité, l'effort devra porter principalement sur la conception de nouveaux matériaux d'électrodes ayant des performances accrues par rapport aux matériaux existants. Si le cahier des charges est aujourd'hui très bien connu, les améliorations viendront de la créativité du chimiste du solide qui proposera de nouvelles structures amenant simultanément les performances et une inertie chimique suffisante pour assurer la sécurité des systèmes. Une attention particulière devra être portée à la compréhension des mécanismes électrochimiques aux interfaces qui sous-tend le développement de nouveaux outils de caractérisation permettant par exemple de suivre *in situ* les réactions électrochimiques.

Dans le domaine des batteries, des solutions alternatives aux systèmes à base de lithium tels que les systèmes au sodium, les systèmes lithium-air et les accumulateurs organiques éco-compatibles sont étudiés par différents groupes.

L'amélioration de la densité d'énergie des supercondensateurs nécessite des recherches sur l'obtention de nouveaux matériaux d'électrode, l'optimisation de matériaux connus ou la conception de nouveaux systèmes. Les systèmes hybrides ou asymétriques, récemment développés, pourraient être des solutions alternatives intéressantes.

L'hydrogène est un vecteur énergétique à considérer principalement lorsqu'il est couplé à une pile à combustible. De nombreux verrous technologiques restent cependant à lever pour résoudre les problèmes de production, de purification et de stockage de ce gaz. Les travaux fondamentaux réalisés dans ce cadre sont développés dans le GDR ACTHYF. Les compétences des équipes de la Section 15 sont mises à contribution pour proposer des solutions de stockage solide dans les hydrures métalliques et les matériaux adsorbants (en particulier les matériaux poreux de types MOF ou carbonés).

## Matériaux pour la filière nucléaire

Le nucléaire participera au « mix » énergétique permettant de répondre à l'accroissement de la demande énergétique et plus particulièrement de la demande en électricité. Pour cela il doit s'inscrire dans une logique de nucléaire durable en s'orientant vers (i) des économies de ressources naturelles, (ii) une gestion optimisée des déchets et leur réduction et (iii) une minimisation des risques de prolifération. Les réacteurs évolutionnaires de génération III et IV devront répondre à ces objectifs, mais également à la production d'hydrogène. Le développement des systèmes nucléaires du futur nécessite de revisiter à la fois les réacteurs et le cycle du combustible. Les activités de la Section 15 participent à ces différents objectifs par des recherches fondamentales et technologiques dans de nombreux domaines relevant à la fois de la métallurgie et de la chimie du solide :

- les matériaux de structure, cuves de réacteurs et circuits de refroidissement primaires et secondaires (corrosion, tenue mécanique dans le cas de caloporteurs gaz ou métalliques, tenue sous irradiation et haute température),

- les matériaux de gainage du combustible : métalliques, céramiques, composites, endommagement mécanique sous irradiation, etc.

- l'amont du cycle avec le recours à des procédés « voie sèche » permettant la réduction des effluents liquides, etc.

- le combustible : pastille, microstructure, influence de l'irradiation, diffusion des espèces gazeuses, etc.

- le retraitement et le recyclage du combustible usé : séparation des actinides et fabrication du combustible MOX par différentes voies (oxalates, sol-gel, etc.), intégration des actinides mineurs dans le combustible ou des cibles, etc.

- les combustibles innovants : méthodes de fabrication des carbures (ou nitrures) mixtes pour réacteur rapide à caloporteur gaz (RNR-gaz),

- les sels fondus, combustibles et caloporteurs,

- le confinement des déchets : élaboration de nouvelles matrices et nouveaux verres (iodures, sulfates, etc.), matériaux vitrocristallins, comportement à long terme sous conditions d'entreposage et de stockage (modélisations numériques multi-échelles, prise en compte des effets de la microstructure, des gels d'altération, influence de l'irradiation, stabilité thermique, etc.).

Ces études, dont certaines sont réalisées dans le cadre du PIR PACEN, nécessitent le développement de nouveaux outils (irradiation, caractérisation, modélisation, etc.) et l'acquisition de données thermodynamiques.

## 2.2 MATÉRIAUX POUR L'HABITAT

Les recherches sur les matériaux innovants destinés à l'habitat du futur se sont forte-

ment développées ces dernières années et cette tendance devrait encore s'accélérer. La plupart des grandes familles de matériaux fonctionnels ont vocation à trouver des applications dans le domaine de l'habitat avec pour objectif de satisfaire deux grandes exigences en liaison avec un développement durable : la sobriété énergétique des bâtiments et la qualité de vie des occupants. Dans ce contexte, les propriétés de base du solide constituent le socle de connaissances nécessaire au développement de matériaux fonctionnels innovants pour l'habitat. Les exemples suivants en sont l'illustration.

Les travaux consacrés aux propriétés électriques et électrochimiques des solides sont à la base du développement des cellules photovoltaïques et des piles à combustible destinées à la production d'électricité décentralisée ou à la cogénération d'électricité et de chaleur dans les bâtiments. Les recherches sur les mésoporeux ont un impact direct sur la mise au point d'isolants thermiques haute performance. De la même façon, les connaissances acquises sur les matériaux à changement de phase sont susceptibles de conduire à des matériaux fonctionnels pour les échanges thermiques de faible amplitude à des températures proches de l'ambiante. Les matériaux sont également incontournables pour l'amélioration de la qualité de vie dans l'habitat. Basés sur la combinaison de propriétés optiques, de conduction électrique et de luminescence, on voit déjà apparaître les matériaux du futur dans le domaine de l'éclairage naturel ou artificiel au travers de vitrages capables de combiner différentes fonctions : isolation thermique et phonique, chauffage par rayonnement, éclairages interactifs par effet électrochrome ou par incorporation de LEDs. Les études sur les matériaux catalytiques ont également un impact important dans le domaine de l'habitat. Des matériaux actifs en photocatalyse et en électrocatalyse déjà appliqués à des surfaces autonettoyantes sont maintenant étudiés pour l'élimination des polluants en intérieur afin de répondre aux nouvelles normes sur la qualité de l'air dans les bâtiments.

Aujourd'hui le champ des recherches ouvert aux chimistes du solide dans le domaine de l'habitat est à la fois très large et multidisci-

plinaire : science des matériaux, thermodynamique, ingénierie. Il nécessite une approche multi-échelles. Contrairement aux matériaux actuels qui sont utilisés le plus souvent sous forme massive les matériaux du futur dans ce domaine se présenteront souvent sous forme de composites, de revêtements ou de couches minces supportées. Dans le domaine des matériaux poreux pour l'isolation thermique et phonique, toutes les échelles (micro, méso, macro) doivent être combinées. Le domaine des matériaux pour l'habitat a aussi un fort contenu technologique et sociétal. De ce fait, les recherches nécessaires à leur mise en œuvre doivent s'effectuer pour une partie à la frontière et en interaction avec d'autres disciplines scientifiques, principalement ingénieries et systèmes, écologie et environnement ou biologie.

## **2.3 MATÉRIAUX POUR LES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION**

Au cours des cinquante dernières années, les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont fortement modifié la qualité de vie en permettant l'accès à de grandes quantités d'information et leurs échanges. Elles ont permis l'essor de nombreux secteurs d'activité (automobile, santé, commerce, etc.). Les laboratoires de la Section 15 sont fortement impliqués dans la conception de matériaux TIC de seconde génération en améliorant sensiblement les propriétés, en étudiant leur intégration dans des micro-dispositifs ou en créant de nouveaux composés ou méta-matériaux fonctionnels.

### **Matériaux pour l'optique et la photonique**

Dans le domaine des télécommunications, des systèmes d'information et de communication, les potentialités des fibres

optiques sont considérables. La recherche de composants guides d'ondes passifs et actifs (émetteurs de lumière) doit tenir compte des exigences sociétales actuelles : produits présentant un rendement énergétique amélioré et un impact moindre sur l'environnement.

Les avancées scientifiques dans ce domaine sont liées au développement de nouvelles technologies pour les guides d'ondes optiques, à l'imagination de nouveaux concepts en termes de dopage par des ions luminescents et de spécifications en longueurs d'onde d'utilisation ou en efficacité de conversion d'énergie, non accessibles par les technologies conventionnelles. Des guides d'ondes innovants sont développés sur la base de nouveaux matériaux hôtes pour l'ion actif ou de l'insertion de nanoparticules métalliques ou semi-conductrices pour augmenter les rendements. Dans la série des lanthanides, d'autres éléments que l'erbium sont d'un grand intérêt pour répondre au marché croissant des fibres amplificatrices ou lasers. Le potentiel de l'amplification Raman peut aussi trouver de nombreuses applications dans de divers secteurs d'activité utilisant les TICs. Une contribution importante des unités de la Section dans le domaine de la photonique appliquée aux télécommunications et à l'optique intégrée consiste à créer des méthodes originales de fabrication de couches et de nanostructures dopées ou non par des ions optiquement actifs. Les nanosciences et nanotechnologies ont un rôle majeur dans la valeur ajoutée des composants du futur pour les TICs.

### **Monocristaux et céramiques de qualité optique**

La fabrication et la caractérisation de cristaux, de céramiques transparentes ou de poudre nano-structurées de qualité optique présentent un intérêt croissant. Les matériaux laser (télécoms, affichage, chirurgie, ophtalmologie, etc.), les matériaux pour les détecteurs à scintillation, les luminophores, entre autres applications, sont particulièrement développés. La mise au point de procédés d'élabora-

tion simples, peu coûteux, peu exigeants en termes de maintenance et de remplacement de pièces, constituent un enjeu industriel de premier plan, notamment pour le développement de matériaux réfractaires à propriétés optiques lasers ou non linéaire. La recherche fondamentale et la R&D en optique sont très consommatrices de monocristaux de grande pureté, sans défauts étendus, à profil de concentration contrôlé et mis en forme pour leur intégration dans des dispositifs opto-électroniques.

### **Matériaux multifonctionnels**

Le magnétisme et la ferroélectricité sont les deux piliers des technologies actuelles pour le stockage de l'information. La recherche de matériaux multiferroïques, pour lesquels ces deux propriétés sont couplées, est donc très importante tant du point de vue fondamental qu'appliqué. Les découvertes récentes d'oxydes de métaux de transition magnétiques dont la polarisation électrique peut être commandée par application d'un champ magnétique, amène les chimistes et les physiciens à revisiter la coexistence entre deux propriétés usuellement exclusives, polarisation électrique et ordre magnétique. Cette communauté s'est organisée au sein du GDR « Matériaux Multi-ferroïques » dans lequel dix laboratoires de la Section 15 sont impliqués.

Les avancées récentes sur ce sujet très compétitif ont pu être réalisées grâce à différentes approches de synthèse et de caractérisation structurale. La première consiste à obtenir des phases d'oxydes massifs magnétiques et isolants – sous forme de cristaux ou de céramiques dont la structure magnétique en spirale résulte d'interactions magnétiques en compétition. La seconde approche repose sur les composites ferromagnétiques/ferroélectriques permettant d'obtenir la coexistence de ces propriétés à la température ambiante. Ceci est illustré par les travaux sur les nanocomposites massifs ou par de nombreux travaux sur les films minces, obtenus par des techniques de dépôt couche atomique par couche atomique, qui offrent la possibilité

d'obtenir un couplage aux interfaces ferro-électriques/ferromagnétiques (ingénierie des contraintes dans des super-réseaux épitaxiés). Comprendre l'origine microscopique du multi-ferroïsme nécessite une analyse fine de la symétrie locale et de la structure magnétique.

Pour créer de nouveaux matériaux multifonctionnels, l'ingénierie des matériaux hybrides est évidemment très utile. Par exemple, coupler des molécules à des feuillettes magnétiques inorganiques est aussi une des voies explorées pour générer de nouveaux multi-ferroïques. Si la partie organique possède des propriétés optiques, la voie hybride crée alors une nouvelle fonctionnalité par le couplage magnéto-optique.

Obtenir des calculateurs plus performants en utilisant des bits quantiques pourrait être réalisé grâce au développement de matériaux présentant des phénomènes de « tunneling » quantique de l'aimantation. Si cette propriété a d'abord été mise en évidence pour les macro spins d'aimants moléculaires, la croissance de cristaux ou de couches minces d'oxydes à structures magnétiques frustrés à spins « Ising » a permis de découvrir que ce phénomène existe aussi dans les matériaux cristallisés inorganiques. Ceci ouvre de nouveaux champs d'application pour les matériaux magnétiques.

## **Méta-matériaux et cristaux photoniques**

Les méta-matériaux redéfinissent les propriétés fondamentales des systèmes en créant artificiellement des méta-atomes donnant aux systèmes des réponses spécifiques aux champs externes. Ces méta-atomes et leurs interactions mutuelles peuvent conduire à de nouvelles propriétés inconnues dans les matériaux classiques et ils offrent la possibilité de façonner des matériaux à des besoins particuliers.

Les cristaux photoniques par exemple (méta-systèmes organisés à l'échelle mésoscopique) qu'ils soient 1D, 2D, 3D, font partie de cette nouvelle famille de matériaux. Les cristaux photoniques sont des matériaux diélec-

triques présentant une variation périodique (ou aperiodique), à l'échelle de la longueur d'onde de la lumière, de l'indice de réfraction ; ce qui a pour conséquence d'interdire la propagation des ondes électromagnétiques dans une certaine gamme de fréquences appelée « bande interdite photonique ». Leur élaboration requiert du chimiste du solide de très bonnes connaissances en synthèse (pour la maîtrise de la monodispersité), en chimie et physique des colloïdes (maîtrise des suspensions) ainsi que dans tous les domaines de la physique pour la caractérisation et la compréhension des nouveaux phénomènes physiques apparaissant.

Les défis que se proposent de relever les chercheurs sont à la hauteur de la complexité des systèmes à construire : matériaux à indice de réfraction négatif pour super-lentilles, lasers sans seuil accordables, cavités photoniques bidimensionnelles formant des guides d'ondes planaires et bien d'autres applications en optique. Des résultats récents montrent que la fiction a rejoint la réalité avec la construction par une équipe allemande de méta-matériaux se comportant semble-t-il comme la cape d'invisibilité d'Harry Potter.

Les auto-assemblages naturels, orientés ou dirigés sont les principales techniques d'élaboration des cristaux photoniques. La technique Langmuir-Blodgett permet également d'obtenir, couches après couches, des structures méta-cristallines exotiques. Quelles que soient les techniques d'élaboration, la présence de défauts, lacunes ou macles, est à ce jour un facteur limitant le développement des applications des cristaux photoniques. De nouvelles techniques d'assemblage, par exemple sous champ magnétique, et la maîtrise parfaite de la monodispersité en taille des particules, permettront d'atteindre des structurations sans défaut de grande dimension. Notons que de nombreuses similitudes sont observées entre l'auto-assemblage 2D de particules de silice et les dépôts atomiques sous ultravide, l'auto-assemblage pouvant constituer un formidable outil pour la modélisation des phénomènes étudiés sous ultra-vide.

L'élaboration de structures diélectriques aperiodiques, avec une symétrie 5 par exemple,

dite quasi-méta-cristaux, par assemblage dirigé de particules de silice produit des structures photoniques très singulières présentant un vrai gap optique.

L'association de méta-atomes diélectriques avec des particules magnétiques, ferroélectriques, multiferroïques ou de lumino-phores permet d'envisager la fabrication de nombreux dispositifs tels que des modulateurs magnéto-optiques spatiaux de la lumière.

D'autres domaines scientifiques s'intéressent à ces concepts tels que l'acoustique où les chercheurs explorent les méta-matériaux pour leur réponse mécanique adaptative ou le contrôle du transfert de la chaleur. Enfin, des guides d'ondes à cristaux photoniques pourvus d'une fente ont montré une forte sensibilité à la détection de biomolécules et les cristaux photoniques incorporant des nanoparticules métalliques se sont révélés d'excellents réacteurs photochimiques.

## 2.4 MATÉRIAUX STRUCTURANTS

La métallurgie est une discipline double : on parle en général de science et d'ingénierie des matériaux métalliques. Elle constitue le carrefour entre la physique, la chimie des matériaux à haute température, la mécanique, le génie des procédés ; elle relève des disciplines qui traitent du développement durable ; son impact économique – en dépit des prédictions pessimistes qui l'affligent à intervalle régulier – ne cesse de croître.

Discipline d'interface, l'ingénierie des matériaux métalliques, ou génie métallurgique, est désormais au cœur des problématiques de la gestion économe des ressources, du recyclage, de la minimisation de l'impact environnemental (1), des économies d'énergie (2), en bref du développement durable. L'élimination des nuisances de la production des métaux et alliages est devenue un enjeu majeur sur le plan commercial autant que de celui de l'environnement. L'invention, puis la fabrication de

nouveaux produits en alliages à forte valeur ajoutée participe au dynamisme du secteur du bâtiment et de la construction en général, des secteurs qui restent très vivaces en France. L'automobile, et plus encore l'aéronautique, recherchent à tout prix l'allègement, facteur d'économies de consommation, et donc de polluants de l'atmosphère, sans que pour l'heure, les composites à matrice non métallique aient réussi à s'imposer. Le génie métallurgique fait ainsi face à de nouveaux défis de mise en forme de produits plats, de mousses métalliques, d'architectures élaborées en vue d'une performance mécanique accrue allié à une diminution significative du poids. En parallèle, la préservation de l'environnement ne cesse de poser de nouvelles interrogations pour inventer de nouveaux procédés sans rejets nocifs, remplacer les polluants comme le cadmium ou le Cr<sup>VI</sup>, recycler, de manière propre, sûre et économique les matériaux en fin de vie et trouver les procédés d'élaboration, de traitement et de mise en forme les moins gourmands en énergie.

Pour relever ces défis, de nouvelles méthodes acquièrent progressivement leurs lettres de noblesse, au premier rang desquelles figurent la simulation sur ordinateur et la modélisation. Des pans entiers de compétences nouvelles sont apparus au cours des deux précédentes décennies, visant tout d'abord l'élaboration des précurseurs métalliques et des alliages à partir de l'état liquide, leur solidification puis leur traitement thermomécanique. De beaux succès sont à mettre à l'actif des équipes associées au CNRS qui ont réussi à simuler ces opérations complexes que sont la refusion des métaux réfractaires, la mise en forme par solidification dirigée des aubes monocristallines des turbines de moteur d'avion, les procédés de solidification utilisant des champs magnétiques ou encore la microstructure et l'état de contrainte mécanique du rail du TGV (3). L'enjeu aujourd'hui est d'écrire une métallurgie prédictive sur ordinateur à l'instar de ce qui a été fait en mécanique des fluides. Si certains segments de la métallurgie sont maintenant bien maîtrisés, nous sommes encore très loin de pouvoir simuler la chaîne complète, allant des procédés d'élaboration

aux opérations de mise en forme et d'usinage. Les métallurgistes auront tout particulièrement à leur charge le calcul des diagrammes de phases et la prévision de leurs transformations mutuelles sous l'effet des paramètres extérieurs que sont la température et l'état de contrainte. Cet objectif impose de maintenir en France une forte compétence en thermodynamique des alliages, expérimentale comme numérique, et la mise en œuvre de moyens puissants de caractérisation *in situ* et en temps réel des transformations qui prennent place non seulement dans des alliages modèles mais aussi dans des objets qui simulent de manière réaliste les effets véritablement observés en fonctionnement et à toutes les échelles pertinentes de la microstructure.

Le génie des microstructures, dont l'écllosion remonte aux années 1960-70, est devenu aujourd'hui l'enjeu majeur de l'ingénierie des matériaux en général, des matériaux métalliques en particulier. Le comportement des matériaux, notamment sous sollicitation mécanique, est le reflet de sa microstructure autant que des caractéristiques intrinsèques de la matière. Les procédés de solidification ou de déformation rapides, la texturation des grains, leur distribution en taille comme en orientation, la cohérence des joints de grains, la précipitation de composés spécifiques au sein de la matrice, pour ne citer que quelques effets, sont autant d'ingrédients déterminants dans les performances mécaniques d'un composant et sa tenue en service. Là aussi, la simulation numérique permet de conjuguer des méthodes propres aux mécaniciens, aux thermodynamiciens et aux spécialistes des transformations de phases pour prédire et donc éventuellement contrôler en cours de déformation ou de mise en forme les propriétés finales d'une pièce, y compris de forme complexe. Les barrières qui restent à surmonter se situent dans l'analyse des stades initiaux des transformations, lorsque les dimensions des précipités ne sont pas très grandes en comparaison des distances interatomiques, lors des cinétiques rapides de transformation, dans la prise en compte réellement tri-dimensionnelle des phénomènes et lorsque des alliages nouveaux, de formulation complexe, doivent être étudiés.

Plusieurs exemples de matériaux nouveaux à fort potentiel de développement applicatif méritent d'être mentionnés ici car c'est sur eux que portent les plus gros efforts de la science des matériaux métalliques actuelle : mousses, composites à matrice métallique, composites renforcés par des particules métalliques, verres métalliques, alliages métalliques complexes et intermétalliques, alliages et composés nanostructurés. Certains de ces matériaux sont élaborés par des procédés très efficaces de refroidissement ou de déformation mécanique qui les portent loin de l'équilibre thermodynamique et par conséquent limitent leur domaine d'utilisation en température. En échange, les caractéristiques mécaniques s'en trouvent exaltées, avec des limites à la rupture qui peuvent atteindre quelques GPa comme c'est le cas avec certains alliages maraging renforcés par des particules nanométriques précipitées *in situ*. De tels alliages trouvent des applications dans des niches comme les outils chirurgicaux pour lesquels la tenue à la contrainte mécanique doit être poussée à un stade ultime. D'autres alliages, comme le Gumetal inventé par l'actuel Président de la recherche de Toyota, ou les verres métalliques massifs, supportent des déformations élastiques considérables sans perte de résistance à la rupture, ce qui en fait des composants de choix dans des niches applicatives comme l'horlogerie, le stockage mécanique de l'énergie, etc. Les intermétalliques ont été très étudiés dans les précédentes décennies, surtout en vue de leur utilisation à haute température car certains d'entre eux combinent une bonne résistance mécanique à chaud et une tenue en corrosion/oxydation remarquable. Si le tour de cette question a été fait en apparence (4), il n'en va pas de même des alliages métalliques complexes, intermétalliques dont la maille cristalline contient jusqu'à des milliers d'atomes. La dimension caractéristique de cette maille devient alors si grande devant la portée des interactions électroniques et le libre parcours moyen des phonons que des propriétés entièrement nouvelles apparaissent. Constitués de bons métaux comme Al, Cu et Fe, certains de ces alliages métalliques complexes deviennent aussi mauvais porteurs de la chaleur que la

zircon, couramment utilisée pour la confection de barrières thermiques. Avec une énergie de surface bien inférieure à celle de leurs constituants, ils sont en mesure de produire des composites à matrice aluminium ou polymère dont la résistance mécanique est bien supérieure à l'état de l'art. Ces composites, quelle que soit la nature du matériau de renfort, les mousses d'alliage léger, les verres métalliques à base Al, Mg, Ti, constituent un enjeu majeur de la science des matériaux métalliques car ils participent à l'effort général sur la problématique de l'allègement des structures. Ils pourraient s'avérer précieux également pour remplacer, d'une part, les métaux polluants en raison de leur excellent comportement en corrosion, leur grande résistance à l'usure et au frottement et, d'autre part, les métaux stratégiques et onéreux utilisés en catalyse comme Pt, Pd, etc. En effet, certains composés définis participent à des réactions chimiques comme le reformage du méthanol avec une efficacité et une sélectivité au moins comparables tout en étant moins onéreux.

L'ensemble de ces travaux concerne le volume des matériaux. La place manque ici pour aborder les connaissances que la métallurgie doit encore engendrer pour assembler les alliages métalliques entre eux : soudage, brasage, frittage, etc. sont des techniques de pointe devenues essentielles dans la perspective de l'allègement des structures (comme par exemple, tôle d'acier contre tôle d'aluminium), et certainement plus encore avec l'apparition des nouveaux produits de l'aérospatial ou du nucléaire. L'assemblage et la mise en forme des nouveaux alliages peu sensibles à l'irradiation neutronique qui seront indispensables à la réalisation des réacteurs thermonucléaires reposent sur une métallurgie qui reste encore largement à inventer. Ces techniques d'assemblage prennent un sens particulier, mais crucial, en électronique car la miniaturisation des circuits, désormais à l'échelle du nanomètre, confine les jonctions entre matériaux à des volumes où l'état de contrainte mécanique et les distances d'interdiffusion interagissent avec la stabilité thermodynamique et le fonctionnement du dispositif. Les métallurgistes qui étudient les défauts structuraux responsables

(ou porteurs) des déformations mécaniques autant que les physico-chimistes spécialistes du transport atomique et des équilibres entre phases sont donc tout particulièrement concernés. Ils se doivent d'affiner leurs modèles autant que leurs équipements d'analyse pour appréhender ces échelles ultimes comparables aux dimensions des mailles cristallines.

Ces thématiques ne sont pas très éloignées de l'ingénierie de surface qui représente l'une des problématiques les plus centrales et les plus actives de la métallurgie actuelle. L'ingénierie des surfaces est indissociable de l'utilisation des matériaux métalliques que ce soit pour la protection contre la corrosion ou l'usure, pour l'apport de fonctions nouvelles (ne serait-ce que la couleur du parement d'un bâtiment), pour le nettoyage ou la préparation d'une surface, etc. Il est fait appel à des techniques de plus en plus sophistiquées, adaptées de la physique des solides sous ultra-vide, pour cerner les premiers instants de la croissance d'un matériau A sur un matériau B, pour étudier l'interaction d'un plasma avec une surface, pour mettre au point de nouveaux procédés de revêtements, qui soient non seulement dépourvus d'impact environnemental, mais aussi capables de produire des films minces de caractéristiques imposées sur une surface de géométrie quelconque. Les techniques issues de la microélectronique comme la MOCVD, les plasmas de toutes sortes, les dépôts en phase liquide sans rejet polluant sont au cœur de ces problématiques : ils ouvrent la métallurgie vers les basses températures, un peu comme la chimie douce a renouvelé la chimie du solide il y a quelques années.

La multiplication des thèmes propres à la métallurgie et à son contexte de compétition internationale va de pair avec l'élargissement de ses méthodes de pensée. Il est frappant de voir à quel point l'application des règles de Hume-Rothery a joué un rôle central dans l'invention du Gumetal, la découverte des verres métalliques et surtout des alliages métalliques complexes. Il est clair que la compréhension affinée des propriétés de transport, thermiques par exemple, des métaux et alliages ne saurait se passer de celle des den-

sités d'états de phonons et d'électrons. Cette même méthodologie devrait intervenir dans la décennie qui vient pour élargir encore le champ de la simulation numérique, en conjuguant par exemple les calculs *ab initio* qu'offrent les différentes variantes de la théorie de la densité fonctionnelle avec des codes Monte Carlo et des codes par éléments finis pour mieux comprendre les stades initiaux de la précipitation. Si cette métallurgie totalement sur ordinateur est encore un rêve, qui ne saurait se passer de l'expérience avec des moyens de caractérisation de plus en plus puissants, elle n'en reste pas moins l'un, si ce n'est le principal enjeu de la métallurgie du moment.

Depuis longtemps parent pauvre de la Section 15 en termes de productivité, de facteurs d'impact, de taux de citations (à quelques remarquables exceptions près), la métallurgie française fait face aujourd'hui à un déclin qui serait inéluctable si les industriels du secteur, autant que les établissements académiques, ne réagissaient pas pour encourager de vigoureuses adaptations des modes de pensée et des outils méthodologiques. La disparition progressive de l'enseignement de cette discipline des cursus universitaires les plus avancés ne fait qu'amplifier le phénomène et doit être combattue avec la même intensité. Telle n'est pas la situation outre-Atlantique ou en Asie où il est aisé de repérer parmi les métallurgistes les plus éminents des porteurs de facteurs H élevés, des adeptes de la publication dans les meilleures revues (Science, Nature, Acta Mat., etc.), des organisateurs de congrès où le voisinage avec la mécanique, la physique et la chimie du solide est la règle pour enrichir la discipline. La crise des industries métallurgiques en Europe, liée à l'effondrement des coûts de main-d'œuvre entraîné par l'ouverture des grands pays asiatiques, a fortement contribué au désintérêt national pour la métallurgie. Cependant, le rôle négatif joué par son isolement sur le plan de la productivité académique évaluée à l'aune des standards admis dans d'autres disciplines ne saurait être ignoré. Le CNRS, avec les Sections 5, 6, 9, 10 et 15 du Comité National de la Recherche se doit de relever le défi, ce qu'il a déjà commencé à faire, en favorisant la meilleure interdiscipli-

narité possible et le renouvellement des générations.

## 2.5 MATÉRIAUX POUR LA SANTÉ

Les outils de la chimie des matériaux et nanomatériaux constituent un apport indispensable à une meilleure connaissance du solide et de ses possibilités d'application dans le domaine de la santé. Les chercheurs de la Section 15 spécialistes de cette chimie créent de nouveaux matériaux pour le médical (diagnostic et/ou thérapie), de nouveaux biomatériaux pour une implantation de plus en plus durable et utilisent parfois des approches bio-inspirées. De nombreuses unités de recherche contribuent à cet axe de recherche pluridisciplinaire aux interfaces entre la chimie, la physique, la biologie et les sciences de la vie.

Ce domaine de recherche des « Matériaux pour la santé » concerne la conception, la synthèse et la caractérisation d'un champ très vaste de matériaux (isolant, semi-conducteur ou métallique ; cristallisé ou amorphe) de morphologie pouvant aller du massif au nanobjet. On trouve le matériau massif dans le domaine de l'imagerie médicale. Les cristaux scintillateurs (détecteurs de rayonnements ionisants) constituent le cœur des tomographes par émission de positons (TEP). À côté des scintillateurs inorganiques standards (NaI, CsI), des matériaux plus complexes issus de la chimie du solide et des laboratoires de la Section 15, ont fait leur apparition ces dernières années, notamment des oxydes mixtes denses (LSO, LYSO, etc.) dopés par des ions de terres rares. Un axe prometteur dans ce domaine semble être le développement de céramiques transparentes qui pourraient se révéler plus avantageuses que des monocristaux (facilité d'élaboration et moindre coût) avec cependant des contraintes spécifiques à ce type de matériau : importance du contrôle de la taille de grains et suppression de la porosité pour obtenir un matériau transparent. Des formats atypiques de scintillateurs (films minces et fibres monocristallines) suscitent également

un intérêt grandissant. Les recherches sur les cristaux et les verres pour lasers médicaux (lasers à solide ou lasers à fibre) présentent un enjeu majeur du aux avantages offerts par le laser pour le traitement sélectif des tissus grâce à une longueur d'onde monochromatique bien précise. Les matériaux élaborés et étudiés sont des oxydes ou des fluorures (monocristallins ou amorphes) dopés par des ions luminescents ou générateurs d'harmoniques (doubleurs de fréquence). Le domaine des films minces inorganiques, hybrides organique/inorganique, mésostructurés, nanostructurés ou à structure hiérarchisée, élaborés par voie chimique ou physique est également un axe fort de la Section. On ne saurait être exhaustif dans la liste de leurs applications pour la santé (capteurs énantiométriques, biocapteurs, membranes sélectives, traitements optiques pour lentilles ou verres, etc.).

Enfin, les nanomatériaux inorganiques ouvrent des nouvelles perspectives dans le domaine biomédical. Les recherches vont de la compréhension des mécanismes de synthèse jusqu'aux développements de sondes polyfonctionnelles pour le diagnostic et/ou la thérapie en passant par les caractérisations structurales et physico-chimiques. Les applications des nanoparticules inorganiques fonctionnelles cristallisées (quantum dots, métaux nobles, clusters, ferrites, manganites, apatites, oxydes de terres rares, etc.) ou amorphes ( $\text{SiO}_2$ ) portent principalement sur la détection par imagerie (sonde luminescente, agent de contraste IRM, imagerie X, scintigraphie) et sur le traitement localisé (hyperthermie, vectorisation, marquage). Des sondes pour l'imagerie médicale basées sur le principe de nanoparticules luminescentes par « up conversion » représentent une alternative originale permettant de contourner le problème du photoblanchiment. Un des enjeux majeurs est l'élaboration contrôlée de nouvelles nanoparticules inorganiques ou hybrides organique/inorganique multifonctionnelles (combinant magnétisme, optique, radiosensibilisation et/ou radioactivité). Cependant, outre le parfait contrôle de la partie inorganique, ces techniques de marquage nécessitent généralement la mise en œuvre d'un greffage à la surface des

nanoparticules par un groupe moléculaire de reconnaissance le plus spécifique possible. De plus, ces nanosondes pour être efficaces doivent être le moins toxiques possible et surtout furtives. Des stratégies d'encapsulation des nanoparticules inorganiques par des couches organiques ou inorganiques permettent d'améliorer sensiblement ces deux propriétés. D'autres études plus fondamentales sont menées sur la relation entre la topologie d'un matériau et la colonisation par des cellules ou des bactéries. L'impact des nanotechnologies sur la santé du patient et du manipulateur des nano-objets fabriqués dont la complexité ne cesse de croître, constitue un point sensible pour les chercheurs, aussi convient-il de renforcer les compétences en toxicologie et écotoxicologie, tout en exigeant des chercheurs le respect des bonnes pratiques de laboratoire. Naturellement, toutes ces études se développent aux interfaces chimie – biologie et chimie – physique, tout en faisant appel à différents domaines de la chimie plus spécifiques des Sections 12 et 14. Des unités de la Section 15 regroupent également en leur sein des biologistes ou des médecins hospitalo-universitaires, ce qui constitue une originalité et un atout.

Dans l'axe « Matériaux pour la santé », apparaît la thématique Biomatériaux qui ne cesse de se développer et de susciter un intérêt croissant aussi bien au niveau national qu'international. Le fort caractère pluridisciplinaire énoncé ci-dessus se manifeste également dans ce domaine. Du fait de l'allongement de la durée de vie de la population, un accroissement considérable des besoins en biomatériaux se fait déjà ressentir. En terme de recherche sur les biomatériaux pour des applications en chirurgie orthopédique et maxillo-faciale, il faut souligner plus particulièrement les efforts réalisés sur les oxydes fonctionnels cristallisés (famille des carbonates et phosphates de calcium, etc.) ou amorphes (bioverres) et sur les biomatériaux métalliques (alliages de titane principalement) qui représentent des biomatériaux privilégiés en raison de leur excellente résistance à la corrosion et de leur caractère biocompatible très prononcé. Dans tous les cas, les recherches semblent s'orienter

vers un contrôle hiérarchique de la structure de ces biomatériaux (micro et macro) et un contrôle de l'évolution de l'interface implant/matériaux biologique (ostéointégration) au cours du temps après implantation. En particulier, le remplacement des os longs subissant de fortes sollicitations mécaniques constitue un « défi matériau » de premier ordre. Le secteur des substituts osseux synthétiques, dans lequel les céramiques tiennent une part de choix, est en plein développement afin de réparer au besoin croissant de réparer des tissus vivants endommagés ou lésés. Les perspectives européennes de croissance annuelle sont d'environ 14%. L'intérêt des chirurgiens pour les matériaux synthétiques, comparés aux allogreffes et aux autres xéno-greffes, réside dans leur faible coût et leur capacité à minimiser les risques d'infections nosocomiales. Ils constituent également une alternative moins traumatique au prélèvement de greffon autologue pour le patient, notamment chez les personnes âgées pour lesquelles l'ostéoporose constitue fréquemment une limite au prélèvement. Le développement d'une nouvelle génération de biocéramiques aux performances accrues constitue un enjeu d'avenir particulièrement important pour l'amélioration de la qualité de vie. Les domaines d'activité concernent la synthèse de céramiques pour la substitution osseuse et l'élaboration d'implants à micro-structure et architecture spécifiques pour des applications en ingénierie tissulaire osseuse. Ceci implique l'étude de la chimie de surface des matériaux et de leurs propriétés de dissolution/érosion en milieu physiologique simulé, la fonctionnalisation des biocéramiques par des molécules actives pour stimuler les processus de régénération osseuse et/ou de traitement thérapeutique, la mise en forme de matériaux hybrides, bioréacteurs à support céramique, par des techniques de prototypage et l'étude des interactions entre la matière artificielle et les milieux vivants. Ce domaine rejoint les études plus globales sur les interactions surface/objet biologique qui sont de première importance en sciences du vivant.

« Biomimétisme et matériaux » est un axe récent mais en plein essor dans lequel les chercheurs s'inspirent des formes, des structures et

des processus de la nature pour concevoir et créer de nouveaux matériaux du futur. En effet, la nature produit des matériaux inorganiques, des hybrides et des composites depuis des millions d'années en utilisant des structures hautement sélectives. Ces matériaux peuvent servir de modèles pour développer de nouveaux concepts et de nouvelles stratégies dans l'ingénierie des matériaux. Il s'agit de l'approche bio-inspirée du chimiste du solide. On assiste au sein de certains laboratoires au développement d'une véritable ingénierie biomimétique permettant d'accéder à de nouvelles architectures multifonctionnelles telles des nano-composites hybrides et des matériaux à structures hiérarchiques.

## CONCLUSION

L'activité de la Section 15 concilie une démarche résolument fondamentale et innovante centrée sur les matériaux. Il s'agit de concevoir, de synthétiser, de caractériser des matériaux pour des applications spécifiques mais aussi des nouveaux matériaux pour les applications de demain. Simultanément, la création de connaissances doit rester l'essence même de notre activité. Pour réaliser ces objectifs nous devons focaliser nos recherches sur la chimie qui doit rester (ou dans certains cas redevenir) notre cœur de métier tout en nous ouvrant autant que possible vers l'extérieur en développant le côté interdisciplinaire de nos recherches. La chimie des matériaux se situe au carrefour entre la physique au sens large, la biologie et le génie des procédés.

Pour réaliser nos missions nous devons dans les années à venir accentuer l'aspect formation de tous les personnels en nous focalisant sur les disciplines de base qui peuvent parfois être négligées dans la formation initiale au profit d'un enseignement « plus à la mode » semblant plus attractif pour les étudiants. En complément, il faudra être vigilant à promouvoir toutes les avancées scientifiques

en les mettant à la portée du plus grand nombre. Dans ce contexte, la communication jouera un rôle essentiel. Cette activité de diffusion de la culture scientifique est l'une des missions du CNRS via les Sections du comité national.

Il faudra favoriser encore plus la politique de création de GDR et d'écoles thématiques qui sont des outils d'ouverture et d'échange au niveau national et qui seront le ciment de la science française complémentaire à l'autonomie des universités.

---

## Notes

(1) Les co-produits de la production du gaz carbonique sont de manière caractéristique, l'acier (1,6 tonne de CO<sub>2</sub> pour 1 tonne d'acier en moyenne), l'aluminium, le ciment, etc.

(2) On évalue à quelques pourcents la fraction du PIB qui disparaît chaque année dans les pays développés en produits de corrosion et d'usure des matériaux, la plupart métalliques.

(3) Sans que cette liste ne prétende à la moindre exhaustivité.

(4) Mais en apparence seulement, car seules les compositions les plus évidentes, binaires pour la plupart, ont été étudiées en détail.

# 16

---

## **CHIMIE DU VIVANT ET POUR LE VIVANT : CONCEPTION ET PROPRIÉTÉS DE MOLÉCULES D'INTÉRÊT BIOLOGIQUE**

*Président*

Anne IMBERTY

*Membres de la section*

Francine ACHER

Véronique ALPHAND

Marie-Christine AVERLANT-PETIT

Françoise COLOBERT

Alexandre DE BREVERN

Éric DEFRANCO

Agnès DELMAS

Delphine DESTOUMIEUX-GARZON

Bruno FIGADÈRE

Thierry JOUENNE

Jean-Christophe JULLIAN

Jean-Pierre LE CAER

Dominique LELIÈVRE

Guy LIPPENS

Jean-François MOUSCADET

Jérôme NIGOU

Sylvie POCHET

Clotilde POLICAR

Jean-Marie SCHMITTER

Nicolas WINSSINGER

L'intitulé de la section 16 place les molécules au centre de cette discipline scientifique à part entière appelée chimie biologie ou biologie chimique. Cette discipline qui lie chimie et biologie implique d'une part l'analyse et la caractérisation des propriétés des biomolécules et d'autre part la conception et l'application de molécules à l'étude et la manipulation des systèmes biologiques. Elle permet ainsi de répondre à des questions biologiques en analysant les systèmes vivants au niveau moléculaire ou en les modifiant. Ainsi, si la biologie procède le plus souvent en proposant des modèles, la chimie peut apporter les outils parfaitement définis et les informations permettant de les confirmer ou de les infirmer.

En maîtrisant cette interaction chimie-biologie, il est possible de pouvoir altérer certaines fonctions d'une cellule ou d'un organisme dans le but de mieux comprendre son fonctionnement et découvrir, par exemple, de nouveaux agents thérapeutiques. Le champ d'action n'est cependant pas limité à la chimie médicinale : la chimie biologique se rapproche des sciences de l'environnement, par exemple dans l'analyse de la matière organique dans différents milieux ou dans la recherche de source d'énergie comme la production d'hydrogène par biocatalyse.

Le développement de méthodologies analytiques adaptées aux biomolécules est un point central de la section. La conception et la mise au point d'approches permettant d'améliorer les seuils de sensibilité représentent un défi permanent. L'étude des propriétés des molécules dans des systèmes complexes, milieux orientés, cellules, membranes..., progresse également de manière très significative. Ces développements sont souvent réalisables grâce à l'apparition de nouvelles technologies : analyse de molécules uniques, techniques d'imagerie, nanopuces... qui ne sont possibles que grâce à la place grandissante que la physique occupe aux côtés de la chimie et de la biologie.

La conception d'outils moléculaires qui permettent d'explorer le vivant ou de le contrôler, dans un but thérapeutique par exemple, est de plus en plus rationnelle. Ce faisant, elle devient totalement transdisciplinaire et fait appel, outre aux techniques de la chimie de synthèse, à la physico-chimie structurale mais aussi à la biochimie, la pharmacologie cellulaire ou encore à l'immunologie.

Deux citations illustrent cette interface entre la chimie et la biologie : « *La chimie est à la biologie ce que le solfège est à la musique* » par Pierre Potier et « *La chimie contrairement à la biologie n'est pas limitée dans la diversité elle peut donc permettre de comprendre la complexité de la biologie* » par Jean-Marie Lehn. Cette deuxième citation met en avant les possibilités infinies qui s'ouvrent aux chimistes dans la construction de leurs objets.

La section 16 en chiffres :

- 360 chercheurs CNRS
- 444 ITA
- 35 unités relevant, en section principale,

de la section 16 : 2 UPR, 21 UMR, 1 FR, 3 GDR, 1 URA, 2 UPS, 2 UMS et 3 FRE.

L'interdisciplinarité est illustrée par le pourcentage de chercheurs de la section 16 affectés dans des laboratoires d'autres instituts : 23 % pour l'INSB contre 69 % pour l'INC et 8 % pour d'autres instituts.

## 1 – DES OUTILS POUR L'ANALYSE DES MOLÉCULES

Le développement méthodologique pour l'analyse des biomolécules est une des missions de la section 16. En partenariat avec les autres disciplines, les progrès techniques permettent de caractériser des molécules de plus en plus complexes, dans des quantités de plus en plus faibles. Un des défis actuels est l'étude des molécules biologiques au sein de la cellule.

### 1.1 RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

Technique issue de la physique fondamentale, la RMN est aujourd'hui un outil indispensable dans la chimie au sens large, y compris la biochimie. De plus, elle a fait ses preuves en chimie médicinale, notamment avec les différentes approches de criblage, et en médecine, où elle est plus connue sous le nom d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM).

Dans toutes ces disciplines, des progrès significatifs sont à prévoir dans les années à venir. En physique, la RMN sur spin unique, par mesure de la force magnétique, pourrait permettre de sonder des surfaces avec une précision sans précédent, tout en identifiant les molécules adsorbées à la surface. En chimie, de nouvelles approches permettant de déconvoluer des mélanges complexes – résultats de chimie organique ou échantillon biologique – et ainsi d'identifier et de quantifier les différentes composantes gagneront en importance. Le couplage avec la chromatographie, par l'analyse RMN directe sur capillaire, et avec la spectrométrie de masse devrait permettre d'analyser en routine des métabolites divers, et pourrait permettre une évaluation médicale rapide d'un patient individuel. L'analyse par RMN haute résolution à l'angle magique (HRMAS) permettra l'analyse d'échantillons entre liquide et solide, comme les tissus ou

les suspensions cellulaires, sans traitement préliminaire des échantillons. Introduire la RMN dans le monde de l'hôpital comme technique de spectroscopie et non seulement d'imagerie sera un défi majeur pour les années à venir.

La RMN des biomolécules reste un axe de recherche important, souvent évoqué pour justifier les investissements en équipement. Néanmoins, limiter la RMN à une technique de détermination de structure tridimensionnelle des biomolécules paraît réducteur. Le développement de techniques plus rapides à partir des seuls déplacements chimiques est un des axes présentant un grand intérêt. La RMN devrait jouer un rôle important dans la caractérisation des états fonctionnels, qui sont peuplés d'une façon dynamique, et contribuera à la compréhension des biomolécules comme entité fonctionnelle. Intégrer cette connaissance structurale et dynamique d'une biomolécule dans le fonctionnement de la vie cellulaire sera un défi important pour la biologie structurale dans les années à venir. La RMN pourra y contribuer par sa capacité à mettre en évidence des interactions moléculaires sur une large gamme de constantes d'affinité. Reconstituer la complexité d'une cellule (ou au moins d'un réseau moléculaire) dans un tube de RMN demandera des efforts importants en biochimie mais également des avancées dans les techniques de RMN, en termes de sensibilité, de marquages sélectifs... L'analyse RMN d'une (bio)molécule directement dans le contexte cellulaire semble maintenant accessible par la «In cell RMN», mais nécessitera cependant de travailler à des concentrations physiologiques, et posera donc les mêmes défis. La RMN du solide sur des biomolécules intégrées dans les membranes ou des agrégats moléculaires comme les fibres amyloïdes pourra aussi connaître un essor important, mais devra être comparée aux avancées importantes en cristallographie et cryo-microscopie électronique des mêmes complexes protéines/lipides que sont les protéines membranaires.

L'imagerie par résonance magnétique devrait également connaître d'importantes évolutions. L'IRM fonctionnelle permet d'ores et déjà de relier une activité cognitive à un

processus neuronal, même si la résolution reste actuellement limitée à une zone du cerveau plutôt qu'à un neurone individuel. Augmenter la résolution dans l'espace et dans le temps pourra renforcer le rôle de l'IRM dans la compréhension des processus neuronaux. Couplée aux avancées méthodologiques dans la spectroscopie optique super-résolution, elle pourra aider à explorer cette terre *incognita* qu'est le cerveau. L'imagerie couplée à la spectroscopie permettra à terme de relier les processus visualisés à une connaissance fine de la biochimie sous-jacente.

L'intégration des approches de RMN dans des problématiques importantes de biologie, tout en maintenant un haut niveau de développement méthodologique permettant de s'adapter aux questionnements de la biologie, semble le défi à venir pour la discipline.

## **1.2 RAYONNEMENTS – DIFFRACTION – DIFFUSION – ABSORPTION**

Un des grands enjeux de la biochimie structurale d'aujourd'hui est de caractériser la structure d'objets moléculaires complexes et/ou difficiles à cristalliser ou à solubiliser. L'utilisation des lignes de lumière des grands instruments français (Soleil) ou européens (ESRF) ainsi que des lignes de neutrons permet de repousser ces limites. La diffraction aux rayons X apporte la description d'une structure à l'échelle atomique fournissant une moisson d'informations. Les approches de cristallographie cinétique permettent maintenant de suivre les changements conformationnels ou les réactions enzymatiques au cours du temps. La cristallisation et la résolution de structures de protéines membranaires ont été abordées avec succès par plusieurs laboratoires français. Un autre enjeu de l'étude structurale est de considérer l'objet à étudier au sein d'assemblages multimoléculaires complexes.

La combinaison de la biocristallographie classique avec d'autres approches de descrip-

tion des biomolécules à basse résolution permet de résoudre des problèmes complexes. La diffusion aux petits angles des rayons X en solution (SAXS) étudie les biomolécules en solution dans des conditions quasi-physiologiques. Associée à la modélisation, cette approche donne accès à la conformation globale de l'objet d'étude, voire à la structure en domaines de protéines. La diffusion des neutrons aux petits angles (SANS), associée à des échanges de solvants deutériés, donne des informations sur la dynamique des biomolécules. L'utilisation de rayonnement synchrotron a permis de plus de développer à Soleil la spectroscopie d'absorption X appliquée aux biomolécules (BioXAS). Cette méthode de biologie structurale donne des informations locales précises sur la structure d'une biomolécule et est applicable à des échantillons sous forme de solution, poudre ou cristal. Cette approche est bien adaptée à la caractérisation des métalloprotéines et permet une étude détaillée des sites métalliques (état électronique, structure du voisinage).

Les développements futurs tels que le laser à électron libre (XFEL) européen en développement à Hambourg permettront d'analyser dynamiquement la matière et en particulier le mode de fonctionnement des molécules avec une résolution de l'ordre de 100 fs. La complémentarité et la synergie entre RMN et utilisation des rayonnements resteront indispensables pour la caractérisation de protéines multidomaine ou localement non-structurées.

### 1.3 SPECTROMÉTRIE DE MASSE

De nombreuses stratégies d'analyse en chimie et biologie font appel à la spectrométrie de masse à des degrés de sophistication très divers.

Parmi les avancées récentes il faut noter les très nets progrès des méthodologies d'analyse quantitative utilisant des isotopes stables, mais aussi des approches ne faisant pas appel à des traceurs isotopiques. L'analyse quantitative

de composés à l'état de traces en matrices très complexes tels que des sédiments ou du plasma sanguin, a notamment bénéficié des progrès notables en matière de rapidité et de sensibilité des spectromètres reposant sur la technologie de type triple quadripôle, permettant d'atteindre des seuils de dosage par spectrométrie de masse au niveau de quelques dizaines d'atomes.

Par ailleurs, la taille des objets analysables par spectrométrie de masse s'est considérablement accrue. Ainsi, l'analyse de protéines intactes est à présent réalisable dans une gamme de masses moléculaires qui a été étendue à plusieurs MDa, par conséquent compatible avec l'analyse d'assemblages complexes de protéines tels que l'on souhaite pouvoir les caractériser en biologie systémique. L'apport de la mobilité ionique est également une avancée majeure dans ce domaine.

Dans le domaine de la caractérisation structurale des protéines, des stratégies mettant en œuvre la spectrométrie de masse associée à des méthodologies telles que l'échange isotopique hydrogène/deutérium, le marquage par voie chimique ou radicalaire, et des agents de réticulation sont de plus en plus utilisées pour la caractérisation d'assemblages de protéines.

L'analyse protéomique a atteint un niveau élevé de fiabilité d'identification de protéines au sein de mélanges complexes grâce à l'utilisation systématique de la spectrométrie de masse en mode tandem (MS/MS). Les analyses d'ions fragments effectuées en majorité par dissociation induite par collision ont été complétées par de nouvelles méthodologies de dissociation par capture d'électrons (ECD) ou transfert d'électron (ETD). De plus, ces méthodologies sont devenues accessibles *via* des spectromètres de masse utilisant des analyseurs de type piège ionique, qui sont d'un coût modéré comparé aux spectromètres de haut de gamme qui étaient requis jusque-là.

D'autres champs d'application de l'analyse à haut débit se sont ouverts, avec notamment l'émergence de la lipidomique. Enfin, il convient de souligner les progrès spectaculaires réalisés en imagerie par spectrométrie de masse.

Dans tous ces domaines, de nombreux laboratoires français se sont illustrés à la pointe de la recherche internationale, montrant clairement l'apport des facettes de la chimie analytique et de synthèse. La mise en place de plateformes de type multi-organismes, rassemblant en un nombre restreint de centres des moyens humains et matériels conséquents a souvent permis une association dynamique entre une entité de service efficace, et un ou plusieurs laboratoires de recherche de pointe en spectrométrie de masse. Ces plate-formes doivent être équipées d'instruments de très haut de gamme afin de poursuivre les développements méthodologiques de la spectrométrie de masse à l'interface de la chimie et de la biologie.

## 1.4 SPECTROSCOPIES VIBRATIONNELLES

Grâce à des développements techniques récents, qui ont amélioré leur sensibilité, les spectroscopies vibrationnelles ont acquis dans les dernières années un intérêt particulier. Des méthodes nouvelles sont apparues pour étudier, entre autres, les systèmes biochimiques : études de monocouches pour obtenir des informations sur la conformation et les interactions de biomolécules situées à l'interface membranaire, d'un grand nombre de constituants sériques sur des micro-prélèvements sanguins, classifications sur des spectres vibrationnels qui permettent le phénotypage de micro-organismes pathogènes ou analyse diagnostic de tissus. L'arrivée sur le marché de détecteurs matriciels a permis l'émergence de l'imagerie infrarouge (IR). La mise en évidence de marqueurs biomoléculaires sur des coupes tissulaires permettra le développement d'une anatomopathologie moléculaire et des progrès applicables en temps réel en clinique (gliomes notamment) dans une discipline où ils ont été quasi-inexistants depuis une cinquantaine d'années. Les spectroscopies vibrationnelles (IR Raman, CARS...) sont particulièrement adaptées à la cartographie

chimique. En effet, dans le cas d'excitations vibrationnelles dans l'IR, aucun photo-blanchiment n'est induit, contrairement à ce qui est observé dans le cas des fluorophores organiques passant à des états électroniques excités dans l'UV ou le visible. Les nanocristaux fluorescents robustes au photoblanchiment ont un désavantage lié à leur taille (dimension de l'ordre de 10 nm) : ils peuvent perturber les propriétés physico-chimiques de l'objet qu'ils marquent, en particulier si celui-ci est de petite taille, et donc ses propriétés de pénétration cellulaire et sa localisation intracellulaire. De ce point de vue, les sondes IR, en plein développement, sont attractives en raison de leur faible dimension. Par ailleurs, l'absorption IR est spécifique d'une fonction chimique donnée, ce qui entraîne un faible niveau de signal non spécifique (contrairement à la fluorescence). Les progrès récents dans la résolution des imageurs et l'utilisation de sources synchrotron ou de techniques de détection utilisant le champ proche donneront accès à l'imagerie fonctionnelle cellulaire.

## 1.5 MICROSCOPIE ET IMAGERIE MOLÉCULAIRE

Les possibilités offertes par l'imagerie moléculaire augmentent rapidement du fait des avancées concertées dans le développement des sondes, des stratégies de ciblage, de l'instrumentation et des méthodes d'analyse d'image. La combinaison unique de résolution spatiale et temporelle, de son aspect non invasif et non destructeur dans les cellules et les organismes fait certainement de la fluorescence la technique de choix pour l'analyse des molécules uniques ou des réseaux. Grâce au développement des sondes fluorescentes, ce type d'approche a abouti récemment à l'étude du gène unique ou du suivi de molécules uniques qui réclament des techniques d'imagerie de plus en plus précises, compatibles avec les résolutions spatiale et temporelle requises pour des études à l'échelle nanométrique sur cellules vivantes.

Les développements récents impliquent de nouveaux systèmes d'imagerie comme la microscopie à deux photons grâce à des sondes spécifiques qui permettent de s'affranchir en partie de l'auto-fluorescence, réduit les dommages photo-induits et le blanchiment et permet une pénétration plus profonde au sein d'un tissu. L'excitation multiphotonique utilisant une excitation dans infrarouge permet des profondeurs de l'ordre de 500  $\mu\text{m}$  à 1 mm. La tomographie sur tissus vivant devrait permettre d'améliorer encore ces performances. Le développement de sondes deux-photons s'avère aussi très important pour l'imagerie intravitale du petit animal où l'imagerie biphotonique devient compatible avec l'endoscopie *in vivo* grâce au développement de fibres GRIN (gradient index lens).

Les interactions protéines/protéines, l'étude des changements conformationnels, de l'activité de gènes, de la synthèse et turn-over protéiques sont autant de phénomènes biologiques qui deviennent accessibles. Les techniques s'étendent à présent également à la manipulation de l'activité de protéines ou l'adressage intracellulaire de celles-ci en utilisant des chromophores activables/inactivables par la lumière. Le nombre de sondes pour de nombreux métabolites et des processus biochimiques augmente également. La diversité des protéines fluorescentes naturelles, étendue par l'ingénierie moléculaire, devrait également continuer de croître ainsi que les méthodes de marquages *in cellulo* fondées sur le développement d'étiquettes génétiques comme la méthode FIASH.

Les futurs développements porteront sur l'augmentation de la résolution spatiale pour la porter au delà du seuil de diffraction théorique. L'augmentation du nombre de sondes compatibles avec les nouvelles approches devra s'accompagner d'amélioration de leurs comportements. Ainsi, la super-résolution (STED) dépend des propriétés moléculaires du point de vue de l'émission stimulée à travers le paramètre d'intensité de saturation tandis que la super-localisation requiert des molécules photo-activables (Microscopie à localisation par photo-activation ou PALM) ou bien pouvant alterner de façon contrôlée par la lumière

entre état fluorescent et un état sombre (Microscopie à reconstruction stochastique ou STORM). Dans le futur, le développement de méthodes de ciblage plus efficaces devrait permettre également de combiner imagerie cellulaire et thérapie dans un seul composé.

La microscopie électronique est également une des méthodes d'étude de la structure des macromolécules et de leurs assemblages dont le potentiel de développement est encore important. En théorie la résolution atomique dans le domaine biologique est en effet possible. La possibilité d'observer à l'échelle moléculaire des suspensions aqueuses ouvre également de nouveaux horizons. L'étude des systèmes moléculaires purifiés a tiré profit du développement de la cryo-microscopie électronique qui voit son champ d'action s'étendre aux systèmes moléculaires organisés. Les enjeux portent sur le développement de la très haute résolution et de la microscopie électronique quantitative pour décrire le fonctionnement du vivant à l'échelle atomique. Ceci demandera la mise en œuvre de méthodologies corrélatives permettant de combiner des informations complémentaires, obtenues à des résolutions différentes (position des atomes, informations de surface, morphologie, dynamique..).

Les techniques de microscopie à champs proche tel que l'AFM devraient également connaître un essor considérable dans le domaine de l'interface chimie-biologie notamment grâce aux mesures en conditions aqueuses ou aux mesures de forces d'interactions.

Enfin, dans le domaine des interactions moléculaires, l'imagerie par résonance de plasmons de surface (SPRi) est appelée à s'étendre, ce qui nécessitera le développement de surfaces spécifiques compatibles avec les biomolécules étudiées.

## 1.6 MODÉLISATION MOLÉCULAIRE-CHIMIOMÉTRIE

Les thématiques de la section 16 incluent de larges large domaines de la chimie compu-

tationnelle et de la biologie computationnelle. Les recherches *in silico* appliquées aux molécules d'intérêt biologique permettent désormais d'appréhender des mécanismes moléculaires de ces molécules. Les approches incluent la modélisation, la chimioinformatique (chimiométrie...) et la bioinformatique au sens large (bioinformatique structurale, bio-informatique, génomique, biologie systémique).

La modélisation moléculaire concerne principalement l'analyse des structures protéines, des assemblages moléculaires, des petits composés naturels ou synthétiques, ainsi que des acides nucléiques. Les méthodes utilisées sont majoritairement la mécanique et la dynamique moléculaire. D'autres technologies d'importance sont le docking de protéines, d'acides nucléiques, de sucres et de petits ligands, le criblage *in silico*, l'analyse de séquences et de prédiction de structures. Les méthodologies utilisées en France combinent le plus souvent des technologies reconnues et des développements novateurs et valorisés.

Il est possible d'utiliser le criblage à haut débit, criblage virtuel ou encore des méthodes prédictives du comportement des molécules dans un environnement. Le nombre de produits chimiques concernés étant immense, des outils adaptés au tri des données et à la rationalisation de l'espace chimique sont indispensables. L'analyse des données permet de valider des modèles mathématiques reliant la structure à ces propriétés. Ces modèles sont utilisés pour appréhender les phénomènes étudiés, prédire des propriétés de produits inconnus et ainsi sélectionner rationnellement des synthèses ou des tests biologiques.

L'ensemble de ces approches nécessite un savoir faire spécifique et impose des développements méthodologiques originaux s'appuyant sur des approches fortement pluridisciplinaires incluant bien évidemment la chimie dans ses différentes spécialités (théorique, organique, bioorganique), l'informatique et les statistiques – en particulier les méthodes d'apprentissage –, la biologie moléculaire/structurale et les sciences du médicament. Ces méthodes permettent donc de

mieux appréhender les mécanismes et la spécificité de liaisons, de sélectionner les molécules les plus prometteuses. Elles ont déjà contribué à la découverte de nombre de molécules actuellement en phases cliniques et sur le marché, et la compréhension des mécanismes spécifiques de reconnaissance.

## 2 – LES MOLÉCULES DU VIVANT : DIVERSITÉ ET POTENTIELS

### 2.1 SUBSTANCES NATURELLES

Les organismes vivants ont développé depuis quelques centaines de millions d'années une diversité moléculaire exceptionnelle illustrée par le nombre, toujours croissant, de métabolites secondaires (substances naturelles) isolés des plantes, insectes, organismes marins et microorganismes. Cette diversité moléculaire et structurale est le plus souvent associée à une diversité d'activités biologiques, une substance naturelle donnée conduisant à un effet pharmacologique *via* son interaction avec une cible biologique spécifique. Les métabolites secondaires d'origines végétale et marine ou isolés de microorganismes représentent, encore aujourd'hui, une des principales sources des médicaments utilisés en chimiothérapie dans différents domaines thérapeutiques. De plus, les substances naturelles ont prouvé leur intérêt indéniable dans leur utilisation en tant qu'outils pour explorer les systèmes biologiques et le fonctionnement des écosystèmes, caractériser des cibles protéiques orphelines et, en conséquence, permettre d'établir un lien entre une cible biologique spécifique et le développement de thérapeutiques ciblées. Les substances naturelles offrent aussi aux chimistes des modèles à partir desquels de nouvelles molécules peuvent être élaborées par synthèse totale ou synthèse biomimétique. Elles peuvent être

aussi utilisées en tant que matières premières, précurseurs, châssis moléculaires dans la conception de structures originales aux applications potentielles multiples

## 2.2 LES BIOMOLÉCULES

**Les acides nucléiques** et leurs composants, les nucléosides, sont impliqués dans plusieurs fonctions cellulaires, telles que la transcription, la réplication, la réparation ou la recombinaison. Il les assure en étant le siège de modifications chimiques ou de structures spécifiques et en interagissant avec un ensemble de partenaires, tels que des protéines, structurales ou régulatrices. Les études structurales et fonctionnelles de l'ADN cellulaire nécessitent le développement de ligands spécifiques, notamment de synthèse, comme sondes et régulateurs artificiels, en particulier pour la caractérisation des structures d'ADN inhabituelles ou des séquences répétées. L'exploitation des propriétés physico-chimiques de l'ADN permet de concevoir des nanomatériaux et nanomachines qui restent cependant à optimiser pour des applications en électronique moléculaire. Les acides nucléiques thérapeutiques, basés sur des ADN ou ARN chimiquement modifiés seront un outil thérapeutique de choix lorsque des méthodes efficaces et ciblées de transfert intracellulaire *in vivo* auront été développées. La chimie apporte des solutions, avec deux grands types d'approches, formation de complexes avec l'acide nucléique et/ou, pour les «oligonucléotides», conjugaison à une molécule avec des propriétés de «transporteur».

Les chimies des **peptides, des acides aminés, et aussi des protéines**, fortes dans de nombreux pays, doivent être reconnues et encouragées, tant les champs d'investigation et d'application sont nombreux : diagnostic, pharmacologie, vectorisation, imagerie, microbiologie, nanotechnologies, etc. Des progrès essentiels ont été réalisés dans la préparation de ces molécules, tant par voie chimique que par voie génétique.

En raison de leur spécificité élevée et de leur profil de faible toxicité, les peptides sont revenus au cœur du développement de nouveaux médicaments. Parallèlement, une approche complémentaire intègre la production de petites molécules mimétiques qui imitent les peptides en vue de surmonter leur manque d'efficacité comme médicaments par voie orale. L'inhibition des interactions protéine-protéine par des peptides et d'autres macromolécules apparentées, et l'évolution des ligands peptidiques mimétiques vers des petites molécules est un objectif majeur du champ, avec plusieurs succès notables.

Probablement, c'est avec la découverte de la réaction de ligation native dans les années 90, que la synthèse chimique des protéines a connu un essor considérable avec un vaste domaine d'application dans l'ère du post-génome où les chercheurs ont la charge de décrypter les fonctions d'une myriade de protéines potentielles. Bien que de nombreuses améliorations en matière de synthèse soient encore nécessaires pour parfaire la versatilité des approches et les démocratiser, cette chimie est en train de révolutionner l'enzymologie en proposant des sondes moléculaires d'activité basées sur des structures protéiques.

La synthèse de peptides naturels non-ribosomiaux ou ribosomiaux de topologie complexe est encore un challenge synthétique et reste la clé de voûte de la découverte de nouvelles cibles thérapeutiques. La conception *de novo* d'oligomères adoptant un nouveau repliement (foldamères) est aussi une voie originale pour la découverte de nouvelles fonctions biologiques ou de nouveaux matériaux.

Les **métaux** sont des éléments endogènes du monde vivant, où, souvent à l'état de trace, ils jouent des rôles fondamentaux. Pour bien comprendre le fonctionnement cellulaire, il est nécessaire d'avoir une bonne description de son génome et protéome, mais aussi de la distribution et de la spéciation des métaux ou métallome. Il existe clairement des mécanismes de sélection et d'import des cations métalliques à l'intérieur des cellules. Le paradoxe est que les cations métalliques sont à la fois indispensables à de nombreux processus

biochimiques, via les métalloenzymes en particulier, mais aussi souvent peu bio-disponibles et toxiques. Pour assurer l'apport de métaux et limiter leur toxicité, le vivant a mis en place des stratégies de chélation visant à récupérer les métaux dans le milieu environnant – où ils sont précipités sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde par exemple – et à contrôler drastiquement la spéciation, la concentration métallique au sein des cellules.

Les métalloprotéines (qui ne sont qu'une partie des métallobiomolécules, mais parmi les plus étudiées et les mieux connues) représentent environ un tiers des protéines et le métal y joue souvent un rôle clef: structuration de la protéine, relai dans une chaîne de transfert électronique, transport de petites molécules ou centre réactionnel catalytique. Les sites actifs métalliques interviennent dans des processus aussi fondamentaux que la conversion du dioxygène en eau et de l'eau en dioxygène mais aussi celle du diazote en ammoniac, du méthane en méthanol ou la production de dihydrogène. De nombreuses métalloprotéines impliquant des métaux variés interviennent dans l'activation du dioxygène pour des activités de type mono-oxygénase ou dioxygénase. Notons qu'il existe une forte intrication entre la biochimie du dioxygène et celle des métaux: le dioxygène, parce qu'il est dans un état triplet de spin ( $S=1$ ), a besoin d'être activé pour réagir avec les molécules organiques qui sont des singulets de spin ( $S=0$ ). Les métalloprotéines, parce que les métaux présentent souvent des états redox paramagnétiques, sont les partenaires de choix pour de telles activations.

L'étude des métallobiomolécules, des complexes métalloprotéines aux petits complexes assurant par exemple la circulation des cations, requiert un savoir-faire pluridisciplinaire, pouvant impliquer des compétences en biologie cellulaire, biochimie, méthodes physiques d'étude (spectroscopies, mais aussi spectrométrie de masse), chimie organique et inorganique et de ce fait est pleinement du ressort de la section 16.

**Les lipides** font partie des nutriments qui contribuent au bon fonctionnement de l'organisme. Ils forment non seulement des réserves

énergétiques mais constituent aussi les membranes de nos cellules. Le lipidome est donc la véritable carte des différents acides gras, en état physiologique, au contact des protéines membranaires. Les lipides non conventionnels ont, pour leur part, un effet des surfactants mimant l'environnement lipidique pour promouvoir des effets stabilisants à l'égard des protéines membranaires. Certains lipides dont les prostaglandines, prostacylines et thromboxanes, sont des hormones lipophiles, capables de traverser la membrane plasmique des cellules pour atteindre leur site récepteur. La découverte de nouveaux lipides, les isoprostanes, marqueurs du stress oxydant, utilisés en clinique et possédant de nombreuses activités biologiques en lien avec l'inflammation et la douleur, ouvre de nouvelles voies pour le développement de molécules actives dans les maladies cardio-vasculaires, pulmonaires et neurodégénératives.

**Les glucides** sous la forme d'oligosaccharides et de glycoconjugués interagissent avec des récepteurs protéiques spécifiques et ont des rôles multiples principalement au niveau de la communication intercellulaire. La synthèse chimique des oligosaccharides complexes reste une thématique ardue. Les voies de synthèse biotechnologiques utilisant des enzymes ou directement des micro-organismes sont en pleine expansion mais les glycosyltransférases qui sont impliquées dans cette biosynthèse ont été moins bien caractérisées que les glycosylhydrolases. La conception d'inhibiteurs spécifiques de ces deux classes d'enzymes a conduit à des applications importantes pour le développement de nouveaux agents anti-infectieux ou antitumoraux et récemment, pour le développement de chaperones chimiques favorisant le repliement de protéines dans certaines maladies génétiques. La synthèse de molécules glycaniques ou glycomimétiques trouve actuellement des applications thérapeutiques dans le domaine des vaccins, des anti-infectieux et des antitumoraux. Les laboratoires publics et privés s'intéressent en particulier aux glycovésicules et glyco-nanoparticules pour la vectorisation et aux polysaccharides sulfatés pour leurs interactions avec les facteurs de croissance. Ces

derniers dérivés ont déjà fait la preuve de leur importance dans le domaine cardiovasculaire et en particulier dans celui de la coagulation. La fonctionnalisation de surface de puces ou nano-senseurs par des oligosaccharides présente des applications importantes dans le domaine du diagnostic pour détecter la présence de microorganismes pathogènes, de virus ou bactéries.

## **3 – CONCEPTION ET SYNTHÈSE DE MOLÉCULES D'INTÉRÊT BIOLOGIQUE**

### **3.1 LA CHIMIE THÉRAPEUTIQUE**

#### **La chimie médicinale**

La chimie médicinale se situe à l'interface de la chimie et de la pharmacologie et a pour but de découvrir de nouveaux composés ayant une activité biologique. Elle inclut la recherche de têtes de série ainsi que leur optimisation, en s'appuyant sur plusieurs approches allant de l'approche rationnelle fondée sur des informations structurales à une approche plus empirique basée sur la synthèse, le criblage itératif de chimiothèques ciblées et la modélisation moléculaire. L'art de l'optimisation des touches a été fortement systématisé dans l'industrie pharmaceutique qui dispose de ressources souvent inaccessibles au sein de nos laboratoires. Il est donc essentiel d'analyser de façon critique l'originalité d'un programme de chimie médicinale au sein d'un laboratoire académique. Bien que de nombreuses cibles validées thérapeutiquement puissent être considérées comme des défis intellectuels attrayant, la valeur d'un nième ligand pour une cible mérite réflexion. À l'opposé, le milieu académique est souvent bien positionné en amont pour démontrer la validité d'une nouvelle cible biologique et développer les premiers outils pharmacologiques ou têtes de série.

Les substances naturelles présentent un intérêt particulier en chimie médicinale de par le fait qu'elles ont déjà été « criblées » par les pressions de sélections liées à l'évolution. Mais la complexité de substances naturelles peut être rédhibitoire dans un programme de chimie médicinale. Bien qu'une simple activité cytotoxique ait longtemps été une motivation suffisante pour entreprendre un programme de synthèse totale, l'originalité du mode d'action devrait aujourd'hui être privilégiée.

Un domaine émergeant s'appuyant fortement sur le savoir de la chimie médicinale est la « chimie génétique », c'est à dire l'utilisation de molécules modulant une fonction biologique, en analogie à l'approche classique de génétique. Bien que cette approche pharmacologique ne soit pas nouvelle, le contexte post-génomique lui donne une nouvelle dimension. Ultiment, l'efficacité et la valeur de cette approche dépendront de la disponibilité d'une collection de molécules hautement annotées pour ses interactions et ses fonctions. À ce niveau, les efforts mis en oeuvre aux États Unis par le NIH (NIH molecular libraries program) sont particulièrement impressionnants. L'émergence de bases de données de résultats de criblage telle que Pubchem Bioassay servira de fondation pour cette annotation. Il serait souhaitable que tout criblage haut débit contienne au minimum un ensemble commun de molécules (composés approuvés pour des traitements thérapeutiques) afin de raffiner cette annotation. Enfin, l'émergence de criblage phénotypique allant au delà d'un simple test de cytotoxicité ou un test d'affinité devrait permettre de mettre en évidence de nouvelles cibles et de nouveaux mécanismes moléculaires.

#### **Chimiothèques et Criblage**

Avec pour objectif d'accélérer la découverte de petites molécules bio-actives, les laboratoires académiques se sont dotés des technologies de criblage à moyen ou haut débit jusqu'alors apanage de grands groupes ou de start-up pharmaceutiques. La Chimiothèque Nationale (CN) créée en 2003 regroupe

des molécules de synthèse, substances naturelles et extraits naturels provenant de différents laboratoires publics français. L'exploitation de ces bibliothèques au sein d'un réseau national des plateformes de criblage constitue un atout pour la valorisation de ces molécules parfois « oubliées ». Le développement de la Chimiothèque Nationale Essentielle, sous-ensemble de molécules de la CN sélectionnées pour leurs propriétés physicochimiques et représentatives de la diversité moléculaire (environ 800 molécules), vise à rendre possible le criblage manuel et à permettre leur annotation. La mise en oeuvre de tests biophysiques et biologiques robustes et miniaturisés est un élément clé du criblage pharmacologique. Le développement de bibliothèques enzymatiques et cellulaires devrait permettre une évaluation rapide des propriétés pharmacocinétiques et biologiques des molécules (cytotoxicité, PK *in vivo*, effet apoptotique, bactéricide, antifongique...), ainsi que la validation de nouvelles cibles biologiques à visée thérapeutique. Lorsque la structure 3D de la cible est connue, le criblage virtuel de chimiothèques suivie de la validation expérimentale par RMN ou RX permet d'accélérer l'optimisation des ligands vers des molécules actives en réduisant le nombre de molécules à tester et en guidant la conception de bibliothèques focalisées. Une approche plus récente repose sur le criblage de très petites molécules (fragments) qui isolément sont de faible affinité pour la cible et dont l'association en présence de la protéine augmente considérablement leurs propriétés inhibitrices.

Ces technologies nécessitent la mobilisation de compétences multiples (chimie, pharmacochimie, biochimie, biologie, chemio-bio-informatique) dans le cadre de collaborations étroites. Certains instituts se sont organisés pour fédérer ces plateformes en plateaux techniques et proposer à la communauté scientifique (publique et privée) ces technologies de pointe, des formations utilisateurs y sont dispensées. Des écoles thématiques permettent de réunir la communauté autour des dernières avancées.

Des résultats significatifs ont d'ores et déjà été obtenus dans des domaines variés (inflam-

mation, prolifération cellulaire, virologie, cancérologie) avec la découverte d'outils de recherche innovants pour comprendre la structure et la fonction de nouvelles cibles, ainsi que des précurseurs de candidats médicaments.

## Vectorisation et Ciblage

Aucune molécule ne peut exercer une activité thérapeutique si elle est incapable de franchir les barrières biologiques qui séparent ses sites d'administration et d'action. La compréhension des processus d'interactions entre un effecteur et les membranes, les fluides biologiques et les espèces qu'il est susceptible de rencontrer durant son parcours *in vivo*, est capitale pour moduler les processus d'adsorption. La vectorisation des médicaments par des nano-objets permet de délivrer le médicament au niveau de sa cible par l'intermédiaire d'un véhicule biocompatible. Un certain nombre de biomacromolécules permettent le transport, le ciblage et le passage transmembranaire des principes actifs. L'élaboration de nouveaux systèmes d'administration et de transport des médicaments, de nature particulière (nanoparticules polymères, liposomes, micelles...) ou macromoléculaires (polymères synthétiques) est un enjeu important nécessitant une collaboration étroite entre chimistes, biologistes, physiciens et praticiens hospitaliers. Les évolutions dans ce domaine mettent en jeu l'élaboration de systèmes dits intelligents s'appuyant sur la connaissance des mécanismes biologiques permettant une libération biorégulée tissu- ou cible-spécifique des principes actifs. Ainsi ces nano-objets peuvent porter une molécule de ciblage, telle que le ligand d'un récepteur ou un anticorps contre une protéine de surface surexprimée dans les tissus visés. Les développements récents exploitent les propriétés physicochimiques du vecteur pour réaliser une activation de ce dernier *in situ* et permettre par exemple la commande de la libération de la molécule d'intérêt à distance, voire une action physique sur le tissu ciblé.

## 3.2 CHIMIE BIO-INORGANIQUE

La chimie bio-inorganique vise à comprendre et à maîtriser les molécules inorganiques du monde vivant, qu'elles soient endogènes (métalloprotéines...) ou exogènes (métallohydrogènes...). Il s'agit à la fois d'expliquer les mécanismes d'action ou le rôle de ces métallobiomolécules, de préparer des composés synthétiques reproduisant leur activité pour en éclairer le fonctionnement, mais aussi de concevoir des systèmes bio-inspirés pouvant présenter des activités biologiques à visée thérapeutique ou industrielle. L'étude des métallobiomolécules et de leurs analogues est par essence pluridisciplinaire, nécessitant le partage de compétences en biochimie, biophysique, chimie organique, inorganique et organométallique, physico-chimie et plus récemment biologie cellulaire, imagerie et chimie théorique. En ce sens, les démarches de ce champ s'inscrivent pleinement dans les axes de la section 16 : chimie du vivant et pour le vivant.

Les centres d'intérêt en chimie bio-inorganique ont été très fortement tournés dans les deux dernières décennies vers la caractérisation à l'échelle moléculaire des mécanismes impliquant des métallobiomolécules et les systèmes mimes dérivés, avec des avancées spectaculaires, notamment grâce au développement des techniques de pointes et de leur version « basses températures » pour étudier les intermédiaires (Mössbauer, RPE, RMN, Raman et IR, masse, RX cryogénique, électrochimie). On observe progressivement depuis quelques années un changement d'échelle des systèmes étudiés. Des catalyseurs d'un format nouveau sont développés, avec l'incorporation de complexes artificiels dans des matrices biologiques ou la modification d'enzymes pour améliorer ou détourner leur activité. L'organisation à des échelles mésoscopiques est aussi de plus en plus au centre des recherches : organisation des complexes enzymatiques impliquant des métalloprotéines, compartimentalisation au sein des organites, maturation et biosynthèse des métalloenzymes avec la question particu-

lière de la biogénèse des centres métalliques, flux de cations métalliques et entités navettes intermédiaires. Notons que le développement de la chimie inorganique médicinale, parce que les propriétés pharmacologiques d'une molécule dépendent étroitement de ses capacités à atteindre sa cible, a accompagné ce déplacement thématique vers des échelles plus intégrées. Se pose avec force la question cruciale et encore mal comprise de la pénétration cellulaire des cations et des complexes métalliques et de leur spéciation *in vivo* et *in cellulo*. En découle la problématique de la détection des complexes et de leur cartographie intracellulaire, avec l'émergence de nouvelles techniques d'imagerie des cations métalliques.

## 3.3 ENZYMOLOGIE – BIOCATALYSE

Le développement de l'enzymologie et de la biologie moléculaire, par delà la connaissance du rôle des enzymes dans les processus du vivant, a ouvert de nouvelles perspectives aux Biotechnologies Blanches (anciennement nommées Biotechnologies Industrielles). Celles-ci sont définies par l'emploi de systèmes biologiques (enzymes isolées ou cellules entières) pour produire ou transformer des molécules d'intérêt industriel. Susceptibles d'irriguer la chimie de spécialité, la chimie fine et même la chimie de commodités, elles touchent des domaines aussi divers que la pharmacie, la cosmétique, la nutrition, l'agrochimie ou la chimie des polymères et sont parfaitement en phase avec les exigences du Développement Durable. En effet les procédés biocatalytiques (biocatalyse ou fermentation) s'effectuent le plus souvent dans des conditions douces (pH neutre, température ambiante, pression atmosphérique), ne nécessitent pas de réactifs dangereux ou toxiques, produisent moins de sous-produits et sont plus rapides que les réactions chimiques équivalentes. Néanmoins, de nouvelles innovations sont encore nécessaires pour rendre ces procédés plus compétitifs que les procédés

chimiques établis de longue date. Dans ce contexte, la conception de nouveaux biocatalyseurs est incontournable et devrait largement profiter des progrès de la biologie structurale, de la modélisation moléculaire et de la bioinformatique.

L'approche génomique et, mieux encore, métagénomique, en permettant de puiser dans la biodiversité notamment celle des microorganismes non cultivables, offre un accès à d'innombrables activités enzymatiques qu'il s'agira d'identifier et d'utiliser. L'étude de microorganismes extrêmophiles et de leurs enzymes conduit à une meilleure connaissance des éléments structuraux nécessaires au fonctionnement des enzymes en milieux et conditions non conventionnels. Une telle connaissance ainsi que le développement d'approches *in silico* contribue à orienter la modification raisonnée d'enzymes afin d'améliorer la productivité des réactions biocatalysées. Plus largement, un catalyseur enzymatique donné peut voir ses performances largement améliorées par l'utilisation des techniques d'évolution dirigée. Le corollaire indispensable de ces approches est la mise au point de tests de criblage haut débit efficaces, particulièrement en ce qui concerne l'analyse de la stéréospécificité.

Le fonctionnement d'un grand nombre d'enzymes nécessite qu'elles soient impliquées dans des systèmes complexes (cofacteur, complexe protéique, complexe membranaire). Le biocatalyseur de choix devient alors la cellule elle-même, naturelle ou recombinante, et sa machinerie métabolique et non plus l'enzyme isolée. L'éventail des microorganismes utilisés à cet effet est encore restreint mais son élargissement permettra de concevoir des biocatalyseurs en fonction du type de réaction choisi mais aussi du type de procédé envisagé.

Le défi majeur reste de concurrencer la Nature dans ce qu'elle fait de plus élégant, la biosynthèse, en clonant les gènes de plusieurs enzymes dans un même organisme-hôte (microorganisme ou plante) et/ou en modifiant et réorientant les voies métaboliques naturelles au profit de la formation de molécules d'intérêt (i.e synthèse de l'artémisine ou de biofuel).

Il convient de noter que ce domaine de l'interface Chimie-Biologie, l'utilisation du Vivant comme alternative à la synthèse chimique, bénéficie d'une large reconnaissance dans les pays du Nord de l'Europe. En revanche, il manque encore de visibilité en France malgré l'existence d'une association (CBSO) fédérant une vingtaine de laboratoires et d'industries.

### 3.4 BIOMATÉRIAUX

Les biomatériaux voient leurs développements s'orienter vers deux voies principales : la reconstitution tissulaire et la vectorisation. La première approche repose sur la génération de polymères biocompatibles à base de dextrane ou d'alginate ou encore d'hydrogels qui seront fonctionnalisés afin de permettre la prolifération cellulaire, et il s'agira là pour l'essentiel de l'ingénierie tissulaire osseuse ou du cartilage. Si la plupart des résultats sont dans le domaine de l'ingénierie tissulaire, on voit également des résultats intéressants dans la construction de valves cardiaques, de stents habillés de principes actifs ou encore de support permettant la transplantation de myoblastes dans des zones lésées à la suite d'un infarctus du myocarde. Le génie du chimiste s'exerce d'une part dans l'habillage des polymères ou d'hydrogels et d'autre part dans la compréhension des mécanismes mis en jeu.

La seconde approche concerne la vectorisation ou la formulation de principes actifs. Le constat de départ provient du fait que nombre de molécules présentent des propriétés des plus prometteuses *in vitro* et même *in vivo* chez l'animal (anticancéreuses par exemple), mais ne deviennent jamais un médicament par défaut de biodisponibilité ou par toxicité aspécifique. Des nanosystèmes, tels des dendrimères peptidiques par exemple, seront développés afin d'aller cibler l'organe ou la tumeur. Le mode de libération est également une question pour laquelle nombre de systèmes « intelligents » sont en développement, par exemple par l'utilisation de réactions enzymatiques

pour permettre une libération biorégulée et tissu-spécifique des principes actifs.

## 4 – PAYSAGE NATIONAL ET INTERNATIONAL

Les chercheurs, enseignant-chercheurs, ingénieurs et techniciens rattachés à la section 16 ont une spécificité, ou une formation initiale, ancrée dans le moléculaire, étant chimistes, physico-chimistes ou biochimistes, qui leur confère originalité et force par rapport à des collègues d'autres organismes, tels que l'INSERM et l'INRA. Cette spécificité peut résulter dans l'affectation de certains chimistes de l'INC dans des laboratoires du CNRS qui ne dépendent pas de cet institut, ou affectés dans des laboratoires hors organisme. De telles situations peuvent donner d'excellents résultats mais demandent cependant une vigilance particulière de la section et de l'institut pour éviter l'isolement.

Tout en gardant la spécificité et le développement scientifique propre à chaque discipline, le dialogue entre chimistes et biologistes est nécessaire pour concevoir des outils originaux afin de déchiffrer les phénomènes biologiques et pour développer de nouvelles approches en chimie médicinale adossée à la biologie structurale. Seules des discussions au quotidien permettront de faire émerger de nouveaux concepts ! Cette approche est en gestation dans les deux ITMOs de l'alliance AVIESAN, bases moléculaires et structurales du vivant (BMSV) et technologie pour la santé (TS). La politique actuelle de l'INSB avec une politique d'affichage de poste à l'interface avec l'INC officialise l'ensemencement des laboratoires des sciences du vivant par des scientifiques avec une forte formation au moléculaire. Il faudrait encourager la réciprocité et faciliter l'embauche de scientifiques formés à la réflexion et aux contraintes inhérentes aux sciences biologiques dans des laboratoires de chimie pour enrichir cette interface qu'est la

« chemical biology », discipline forte dans les pays anglo-saxons, mais qui a encore du mal à s'installer en France.

## 5 – RAPPORTS AVEC L'INDUSTRIE

La Biologie Chimique est un domaine qui se prête très bien aux relations avec les industries, en particulier dans le domaine pharmaceutique. De nombreux laboratoires de la section mènent une politique fructueuse de valorisation souvent en relation directe avec de grands groupes industriels.

Les nouvelles structures mises en place, tels que les pôles de compétitivité facilitent les contacts entre laboratoires, sociétés de biotechnologie et groupes pharmaceutiques. Les TPE (très petites entreprises) de RD seront amenées à jouer un rôle important à l'interface entre les laboratoires académiques et les grands groupes multi-nationaux. Les structures de valorisation ont également gagné en efficacité au cours des dernières années mais leur multiplication, corrélée à l'autonomie des universités, complique le paysage.

L'intérêt actuel dans la prise de brevet et les contrats ne doit pas résulter en une trop forte préférence pour les sujets « potentiellement valorisables » dans les laboratoires. Les progrès scientifiques, qu'ils soient dans le domaine fondamental ou appliqué, ne se rencontrent pas en suivant une stratégie trop contrainte ou guidée.

## 6 – FORMATION – ENSEIGNEMENT

Les enjeux de la recherche en ce début du XXI<sup>e</sup> siècle sont la compréhension des méca-

nismes associés à la vie, au niveau moléculaire et cellulaire aussi bien qu'au niveau des organismes, des populations et des écosystèmes, et la mise au point de composés ou de méthodes pour les réguler. Les retombées attendues concernent aussi bien la santé humaine et animale (médicaments, vaccins, matériaux biocompatibles pour prothèse, diagnostic) que l'agroalimentaire, les biotechnologies ou l'environnement.

Les chimistes ont un rôle très important à jouer dans ce large panorama et on peut imaginer la période à venir comme foisonnante en découverte pour le chimiste à l'interface chimie biologie. La richesse biologique devrait naître de la diversité des approches.

Dans ce contexte, les membres de la section 16 pensent qu'une confrontation intellectuelle de qualité entre les chimistes et les biologistes n'est possible que si la formation vise à donner aux chimistes une large ouverture sur la biologie. Ainsi, des formations pluridisciplinaires avec pour objectifs de donner aux étudiants de solides connaissances en Chimie et en Biologie doivent être proposées (et soutenues) et ceci dès l'enseignement niveau Licence et Master. En outre, de tels cursus doivent permettre aux diplômés de trouver un emploi dans des équipes pluridisciplinaires au niveau académique ou industriel.

Peu à peu on voit fleurir de telles formations au niveau Master et Licence sur nos campus. Des parcours tels que « Chimie et Procédés/Biologie » en Licence et « Chimie et Procédés/Chimie et Vivant » en Master ou Master Chimie spécialité Chimie-Biologie sont ainsi proposés dans certaines Universités. Ces formations sont très prisées par les étudiants qui sont « fascinés » par les questions posées par les Sciences de la Vie. Toutefois, il est primordial pour ces formations à l'interface d'établir un juste équilibre entre l'apport de connaissances en Chimie et en Biologie ; que ces formations apportent de solides compétences en Chimie doit rester une réalité.

De même, un certain nombre d'Universités associent au sein de leurs Écoles Doctorales les

chimistes et biologistes (École Doctorale Chimie et Science du Vivant par exemple). Ces écoles ne doivent pas être seulement la juxtaposition d'une École Doctorale de Chimie et d'une École Doctorale de Biologie mais doivent être un levier efficace pour inciter les chercheurs à communiquer ensemble. L'organisation de journées scientifiques, l'ouverture de modules transverses destinés aux doctorants sont autant d'outils efficaces à mettre en oeuvre.

Le CNRS, grâce à l'existence de l'Institut de Chimie peut gérer une interface Chimie-Biologie et créer des laboratoires pluridisciplinaires permettant d'explorer le monde du vivant et par ce biais en liaison avec les Universités les inciter au développement de formations à l'interface Chimie-Biologie.

## 7 – CONCLUSION

Comme nos prédécesseurs dans cette section, nous ne pouvons conclure autrement qu'en défendant vigoureusement la notion même d'une interface entre la chimie et la biologie.

– La création des Instituts du CNRS représente un risque d'enfermement thématique qui devait être contrebalancé par l'existence de « pôles inter-instituts ». À l'heure actuelle, trop peu de passerelles sont lancées entre les instituts.

– La multidisciplinarité et l'interdisciplinarité devraient être encouragées par des programmes spécifiques. Les PIRs sont des outils certes intéressants mais ne disposant que de moyens limités.

– L'interface doit être également reconnue lors de l'évaluation de la carrière des chercheurs. La course aux facteurs bibliométrique encourage l'hyper-spécialisation et ne permet pas de valoriser les chercheurs s'engageant dans la coordination de projets d'interface.



# SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

*Président*

Françoise GENOVA

Jean-Luc ATTÉIA  
 Olivier BIENAYMÉ  
 Torsten BÖHM  
 Jonathan BRAINE  
 Athéna COUSTENIS  
 Jean-Gabriel CUBY  
 Pierre DROSSART  
 Guillaume DUBUS  
 Thierry FORVEILLE  
 Maryvonne GÉRIN  
 Christian GUILLAUME  
 Vanessa HILL  
 Guilaine LAGACHE  
 Frédérique MOTTE  
 Jean-Pierre MICHEL  
 Denis MOURARD  
 Olivier MOUSIS  
 Pascal PAYSSAN  
 Phillip TUCKEY  
 Nicole VILMER

## 1 – LES GRANDS ENJEUX DE L'ASTROPHYSIQUE

Les grands enjeux de l'astrophysique tournent aujourd'hui autour de la question des origines : origines de l'Univers, des systèmes planétaires, de la vie. C'est, comme les autres disciplines de l'INSU, une science observationnelle, basée sur le recueil sur le long terme de grandes masses de données par des instruments très divers, au sol et dans l'espace, en général bâtis autour de collaborations internationales, bilatérales ou multilatérales, souvent à l'échelle européenne. Deux agences intergouvernementales mettent en place au niveau européen des moyens pour la discipline, l'Observatoire Austral Européen (European Southern Observatory – ESO) et l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency – ESA), ainsi que plusieurs sociétés internationales comme l'Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) et le Télescope Canada – France – Hawaii (TCFH ou CFHT). Les Très Grands Équipements (ou Très Grandes Infrastructures de Recherche dans la terminologie employée par le Ministère) sont donc un élément majeur pour la discipline, sans lesquels celle-ci n'existerait simplement pas. De même, les Services d'Observation mis en place en support au recueil de données et les personnels du corps des Astronomes et Physiciens jouent un rôle fondamental.

La préparation et l'utilisation des grands instruments requièrent une organisation nationale forte, et la mise en réseau des compétences au niveau national et international – les différents aspects de l'activité de recherche s'effectuent de plus en plus au sein de grands consortia.

L'interdisciplinarité est également un élément constitutif de l'astronomie, et de nombreuses interfaces existent avec les disciplines intéressées par les questions et les objets étudiés.

L'une des grandes avancées récentes pour la discipline a été la création en 2005 par les agences européennes de recherche en astronomie du réseau ASTRONET, dans le cadre des ERA-NET mis en place par la Commission Européenne pour encourager la coordination des activités de recherche dans les pays membres et associés. L'objectif d'ASTRONET, qui est coordonné par le CNRS/INSU, est d'établir une planification sur le long terme pour l'astronomie en Europe : cela est passé en particulier par l'établissement d'une « Vision scientifique pour l'astronomie européenne », un document détaillé, produit en 2007, qui identifie les questions clés des vingt prochaines années :

– comprenons-nous les extrêmes de l'Univers?

– comment les galaxies se forment-elles et évoluent-elles?

– quels mécanismes sont à l'origine des étoiles et des planètes et comment évoluent-elles?

– comment nous et notre système solaire trouvons-nous notre place?

Ces questions recourent – heureusement – celles identifiées par l'exercice « Cosmic Vision 2020 » mené vers la même époque par l'Agence Spatiale Européenne :

– quelles sont les lois fondamentales de l'Univers?

– comment l'Univers s'est-il formé et de quoi est-il fait?

– comment le système solaire fonctionne-t-il?

– quelles sont les conditions nécessaires à la formation des planètes? à l'apparition de la vie?

C'est sur ces questions que se construit la stratégie de développement des moyens instrumentaux : elles ont servi de base à la « Feuille de Route » européenne des infrastructures publiée par ASTRONET en 2008, un panorama très complet qui inclut les infrastructures sol et spatiales et qui met en toute première priorité deux très grandes infrastructures sélectionnées par le Forum ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures), l'European Extremely Large Telescope (E-ELT) et le Square Kilometer Array (SKA). Cette Feuille de Route insiste sur la complémentarité entre les coopérations multilatérales, en particulier celles mises en place via l'ESO et l'ESA, et la colonne vertébrale fournie par les communautés nationales et les programmes nationaux et locaux. Elle prend en compte tous les thèmes de l'astronomie, de l'Univers Lointain au Système Solaire, et met en relief la nécessité de développer une instrumentation qui couvre tous les domaines de longueur d'onde, et au-delà, avec les astroparticules et les ondes gravitationnelles, pour observer l'ensemble des phénomènes cosmiques. Elle s'intéresse aussi aux outils (théorie, calcul, données, astrophysique de laboratoire, et développement technologique), et souligne l'importance de la diffusion des connaissances et des ressources humaines.

Au niveau national, l'INSU organise régulièrement des exercices de prospective pour chacune de ses disciplines – le premier exercice de prospective national pour l'instrumentation en astronomie remonte à 1987. Les Sections produisaient en parallèle leurs rapports de conjoncture et de stratégie scientifique. Depuis 1998, l'exercice de prospective est mené de façon conjointe par la Section et par la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique. Le dernier exercice de prospective a mobilisé la communauté en 2009. Il a combiné une analyse détaillée du positionnement national en terme de priorités scientifiques, des forces et des faiblesses de la communauté dans les différents champs disciplinaires, avec l'établissement d'une stratégie

de développement des moyens : grands instruments sols et moyens d'accompagnement, ainsi qu'une analyse de l'organisation de la discipline (y compris pour l'enseignement et la diffusion des connaissances), du contexte national et européen, des Services d'Observation, et des personnels et métiers. Une attention particulière a été également portée aux interfaces interdisciplinaires et aux synergies sol-espace – le CNES avait réalisé son propre exercice de prospective des moyens spatiaux début 2009, réaffirmant la priorité donnée aux programmes de l'ESA et à l'exploitation des instruments.

Le document de prospective a été publié par l'INSU à la suite du Colloque final, qui s'est tenu à La Londe Les Maures en octobre 2009. Le présent rapport de conjoncture résume une partie des éléments de la prospective, principalement l'analyse des thématiques scientifiques, mais également différents aspects qui concernent les moyens de la discipline et le contexte dans lequel celle-ci travaille.

## 2 – ANALYSE THÉMATIQUE

La discipline est structurée, au niveau national, en Programmes Nationaux qui sont chargés de la prospective et de l'animation des différentes thématiques. Ces Programmes, le Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG), le programme Physique Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI), le Programme National de Physique Stellaire (PNPS), le Programme National Soleil-Terre (PNST), le Programme National de Planétologie (PNP), et le GdR Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie (PCHE), ont été largement mis à contribution pour la discussion et la rédaction des aspects scientifiques de la prospective, y compris pour la définition des besoins en terme de moyens. On trouvera ci-dessous un résumé de ce travail, chaque partie couvrant le domaine de l'un des Programmes Nationaux ou du GdR PCHE. L'une des recommandations de la pros-

pective a été de structurer les aspects liés aux Systèmes de Références, qui constituent la septième partie de cette section.

On retrouvera bien sûr dans l'analyse qui suit les grandes questions identifiées par les prospectives européennes, recadrées dans la perspective nationale. L'identification des priorités, des forces et des faiblesses permet de structurer le travail d'organisation des Programmes, et a fait émerger des recommandations en terme de moyens et d'organisation. Les nombreuses interfaces entre les programmes et avec les autres disciplines apparaîtront au fil du texte. Les relations avec les autres disciplines sont remises en perspective § 4,1.

### 2.1 COSMOLOGIE, UNIVERS PRIMORDIAL, ORIGINE ET ÉVOLUTION DES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS ET DES GALAXIES

La recherche dans le domaine de la cosmologie et des galaxies est aujourd'hui guidée par plusieurs questions fondamentales, qui suscitent des études aussi bien sur le plan théorique qu'observationnel. Parmi celles-ci :

- cosmologie théorique : dans quel univers vivons-nous ?
- quelle est l'histoire des baryons dans un univers hiérarchique ?
- quels processus physiques dominent l'évolution des galaxies ?
- comment les galaxies du Groupe Local se sont-elles formées ?

#### Faits marquants

– *Avancées sur la caractérisation du modèle cosmologique.* La mise en oeuvre et l'exploitation par des équipes françaises des 400 nuits d'observation du CFHT-Legacy

Survey (CFHT-LS) avec MegaCam a conduit à plusieurs résultats majeurs récompensés par des médailles d'argent (P. Astier à l'IN2P3, Y. Mellier à l'INSU). D'un côté, le programme SNLS de détection de supernovae de type Ia (SNIa) a produit le plus grand échantillon de SNIa lointains à ce jour, apportant des contraintes importantes sur la densité de matière de l'univers et sur l'équation d'état décrivant les propriétés de l'énergie noire. D'autre part, l'analyse des distorsions gravitationnelles de millions de galaxies du CFHTLS-WL (Weak Lensing) a permis de caractériser le spectre de puissance de la matière noire aux échelles entre 750 kpc à 90 Mpc et pose les meilleures contraintes actuelles sur la normalisation de ce spectre.

– *Structuration de la matière noire et des baryons.* La résolution spatiale des satellites XMM-Newton et Chandra a permis de montrer que le profil de masse dynamique d'un amas (révélé par l'émission X du gaz chaud intra-amas) est quasi-universel. L'analyse multi-longueur d'onde du relevé COSMOS, dans lequel plusieurs équipes françaises sont fortement impliquées, a permis d'étudier l'impact de la structuration de la matière noire sur l'évolution des baryons. L'aspect Weak Lensing de ce relevé a ainsi permis de produire la première carte 3D de la matière noire dans un grand volume d'univers et de comparer celle-ci avec la distribution de la matière lumineuse prisonnière des puits de potentiel.

– *Processus physiques de formation et d'évolution des galaxies.* Les satellites GALEX et Spitzer ont ouvert de nouvelles fenêtres d'observation de l'univers, dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge, permettant la mesure de l'activité de formation d'étoiles des galaxies jusqu'à l'époque  $z \sim 2$  ( $z$  est le décalage vers le rouge ou redshift). La combinaison avec d'énormes échantillons de spectres optiques (SDSS, VVDS) a donné lieu à un nouveau type d'analyse statistique des paramètres physiques de galaxies (tels que la masse, le taux de formation d'étoiles, la métallicité, le contenu en poussière, l'activité nucléaire) en fonction des paramètres structuraux, de l'environnement et de l'époque cosmique.

– *Avancées en archéologie galactique dans le Groupe Local.* Les galaxies du Groupe Local offrent l'opportunité d'explorer en détail les vestiges de la formation de galaxies individuelles. Les équipes françaises se sont distinguées sur deux aspects très complémentaires de l'archéologie galactique. Le premier est l'identification d'étoiles extrêmement déficientes en métaux dans le halo de la Voie Lactée, dont les abondances placent des limites inédites sur l'âge et les conditions de nucléosynthèse primitive de formation de notre Galaxie. L'autre aspect concerne la caractérisation des populations stellaires dans les parties externes des galaxies du Groupe Local, où l'on trouve les vestiges d'événements d'accrétion aux époques reculées où les grandes galaxies à disques, comme la Voie Lactée et Andromède, ont commencé à s'assembler. Les signes de plusieurs fusions subies par la galaxie d'Andromède au cours des derniers milliards d'années ont ainsi été mis en lumière par un sondage grand champ au TCFH.

En dehors de ces faits saillants scientifiques, un changement structurel du paysage français est intervenu par la création du Programme National de Cosmologie et Galaxies (PNCG), issu de la fusion des anciens Programmes Nationaux de Cosmologie (PNC) et Galaxies (PNG).

## Forces et faiblesses de la communauté

La communauté française « cosmologie et grandes structures » a démontré sa capacité de mobilisation autour des projets « énergie sombre ». L'émergence d'une nouvelle communauté pour l'analyse des oscillations acoustiques des baryons (BAO : projets SDSS-III/BOSS, HSHS et BigBOSS) est de ce point de vue exemplaire. Il faut souligner également les contributions récentes très remarquées d'équipes françaises en cosmologie théorique. Elles ont affirmé leur compétence aussi dans la mise en oeuvre, le traitement des données et l'exploitation scientifique des grands relevés d'imagerie (CFHT-LS), de spectroscopie (VVDS) et de spectroscopie intégrale de champ (SAURON, IMAGES, MASSIV).

Les équipes françaises ont largement participé à l'exploitation et à la valorisation du radiotélescope de l'IRAM au Plateau de Bure, qui est l'instrument actuel le plus performant au monde pour détecter les galaxies distantes. Des programmes importants ont aussi permis de cartographier le milieu interstellaire des galaxies proches et d'étudier, notamment, l'alimentation des noyaux actifs. Cette expertise est précieuse pour la future exploitation d'ALMA. Il serait souhaitable que communauté française exploitant l'IRAM s'élargisse pour assurer le retour scientifique d'ALMA et en préparer les futurs compléments (NOEMA, CCAT). Aux plus basses fréquences, la communauté mobilisée sur la préparation de SKA et ses précurseurs devrait aussi s'élargir.

La France se distingue aussi dans les domaines de l'astronomie infrarouge spatiale (formation d'étoiles et propriétés du milieu interstellaire des galaxies) et de l'analyse du rayonnement de fond cosmologique (signal cosmologique et avant-plans).

La France est également impliquée de façon majoritaire dans le consortium Gaia. Cependant, il faut noter qu'elle ne dispose pas du (des) spectrographe(s) grand champ multi-objet nécessaire(s) aux nombreuses observations complémentaires qui permettront d'optimiser le retour scientifique de la mission : la réalisation d'un tel instrument est une priorité forte.

Les chercheurs français développant des simulations numériques de formation et d'évolution des grandes structures et des galaxies ont su fédérer leurs efforts au sein du projet Horizon. Cette stratégie leur a permis de hisser la France dans le peloton de tête des acteurs mondiaux du domaine. Bien que les équipes françaises aient récemment produit des simulations numériques innovantes et compétitives à l'échelle cosmologique, la valorisation de ces simulations n'est pas encore optimale.

Un changement structurel, ressenti au-delà de la seule communauté nationale (et dans tous les domaines de la discipline), est le renforcement de la recherche par de grands consortia aux dépens des petites colla-

borations. Ce nouveau mode de fonctionnement résulte de la taille, du coût et de la complexité des nouveaux instruments, qui favorisent les grands groupes internationaux.

## Évolutions et perspectives

Le domaine de la cosmologie et de la physique des galaxies est en pleine effervescence avec la mise en service des satellites Herschel et Planck, celle proche de Gaia et du JWST, et l'arrivée du télescope ALMA au Chili, suivi de l'ELT. Nous entrons dans une ère de cosmologie de précision avec des contraintes de plus en plus fortes sur les quantités des différentes formes de matière et le type d'énergie noire. Simultanément, de très grands échantillons de galaxies par intervalle de décalage spectral permettent d'affiner les simulations de la formation des structures. Planck observe le ciel entier et permettra de cartographier le fond diffus cosmologique (CMB) au micro-Kelvin, avec une finesse telle que de nouveaux pics dans le spectre de puissance seront résolus, donnant accès à des aspects physiques nouveaux de l'Univers primordial. Herschel observe les galaxies en détail tant du point de vue morphologique que chimique, dans le nouveau domaine de l'infrarouge lointain. ALMA complètera le dispositif dans cette gamme de fréquence avec une très haute résolution et une très grande sensibilité dans le millimétrique et le submillimétrique, où émettent les molécules et la poussière du milieu interstellaire froid. Le télescope, plus tard complété par le JWST, permettra aussi de détecter les sources responsables de la réionisation de l'Univers ainsi que les premières galaxies. Une approche alternative à l'étude des galaxies à haut redshift consiste à explorer en détail les populations stellaires résolues en étoiles où sont encodées les traces de leur formation à des époques primitives. Le satellite Gaia bouleversera bientôt notre connaissance de notre propre galaxie en dressant une cartographie de précision des positions, vitesses, chimie et âge d'un milliard d'étoiles. Le JWST et l'ELT permettront d'étendre les études de diagrammes couleur-magnitude de popula-

tions stellaires voisines jusqu'aux galaxies de l'amas de la Vierge, donnant pour la première fois accès à l'histoire détaillée de la formation d'étoiles dans des galaxies de tous types et masses. À l'interface avec l'astrophysique des hautes énergies, la communauté devra aussi s'emparer de l'«outil» sursauts gamma, qui sont aussi une sonde cosmologique, en particulier avec la sonde spatiale SVOM.

Sur la question de la caractérisation du modèle cosmologique, et en particulier de l'énergie noire, non incluse dans le modèle standard mais qui attire l'intérêt des physiciens des particules, nous attendons des avancées majeures où la physique théorique, la physique des hautes énergies, la cosmologie et l'astrophysique doivent joindre leurs forces pour repousser les frontières de la connaissance. L'apport potentiel du LHC va également dans ce sens.

## **2.2 ASTROPHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES, OBJETS COMPACTS, ASTROPARTICULES, ONDES GRAVITATIONNELLES**

L'astrophysique des hautes énergies, des objets compacts et des ondes gravitationnelles cherche à comprendre les extrêmes de l'univers, un des cinq thèmes majeurs identifiés par les prospectives européennes ASTRONET et Cosmic Vision. Issu de l'étude du rayonnement cosmique puis des émissions radio, gamma et X, le domaine unit maintenant astrophysiciens, physiciens nucléaires, physiciens théoriciens et physiciens des particules dont les problématiques et les savoir-faire sont complémentaires. Le développement de la thématique astroparticules est particulièrement marquant ces dernières années : après l'ouverture du domaine des gammas de haute énergie, l'objectif est maintenant celui d'une astronomie « multi-messagers » à l'aide des ondes gravitationnelles, des neutrinos ou des rayons cosmiques.

Plusieurs projets phares de la discipline sont maintenant en phase d'exploitation :

HESS et Fermi (rayonnement gamma haute énergie au sol et dans l'espace), et Auger (rayonnement cosmique), tandis que la communauté continue de bénéficier des observatoires spatiaux XMM-Newton et INTEGRAL dans le domaine des rayons X et gamma mou. Antares explore la Antares détection sous-marine des neutrinos, et Virgo celle des ondes gravitationnelles. Il faut également noter les outils exceptionnels que sont X-Shooter (spectrographe au VLT) et LOFAR (radio basses fréquences) qui entrent tout juste en phase d'exploitation, ainsi que le lancement prochain d'AMS-02 (rayonnement cosmique).

### **Faits marquants**

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a connu ces dernières années des avancées importantes :

– *la richesse insoupçonnée du ciel gamma aux très hautes énergies dévoilées par HESS.* En particulier, l'observation du plan galactique révèle une multitude de sources. HESS a franchi le pas important d'une astronomie exploratoire (avec seulement quelques sources connues depuis plusieurs dizaines d'années) à une astronomie mature, avec à la clé la compréhension des phénomènes d'accélération de particules dans l'Univers.

– *la mesure d'une anisotropie du rayonnement cosmique d'ultra-haute énergie par Auger.* L'origine des rayonnements cosmiques reste une question centrale de l'astrophysique des hautes énergies. Ils sont généralement déviés par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques, et seuls les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ( $E > 5 \cdot 10^{19}$  eV) subissent si peu de déviation que leurs directions d'arrivée sur Terre indiquent éventuellement leurs sites d'accélération. Les premiers événements à très haute énergie enregistrés par l'Observatoire Pierre Auger sont distribués de manière anisotrope sur le ciel.

– *l'imagerie de l'annihilation  $e+e-$  au centre de notre Galaxie et la découverte de l'asymétrie du disque.* Depuis les années 1980

on savait que les régions centrales de notre galaxie sont le lieu d'une forte annihilation électrons-positrons, cependant la source des positrons reste inconnue. Le spectromètre SPIE d'INTEGRAL a mis en évidence la forte concentration de l'émission à 511 keV vers le centre galactique, et a pu cartographier celle-ci, montrant qu'elle est asymétrique avec un excès dans une région qui abrite un grand nombre de binaires X de faible masse, ce qui suggère que ces objets pourraient être une source importante de positrons galactiques.

– *la découverte de sursauts gamma à grand redshift et la caractérisation de leur émission haute énergie.* Les sursauts gamma, très brillants mais relativement brefs, ont été proposés depuis longtemps comme d'excellentes sondes potentielles de l'Univers lointain. En 2005, grâce aux observations de sa rémanence observée par TAROT, un sursaut a été identifié comme ayant été émis à  $z = 6,3$ , rivalisant ainsi avec les objets connus les plus lointains, et en 2009 un autre l'a été à  $z = 8,2$ , ce qui en fait l'objet le plus distant jamais observé. Ces observations ouvrent la voie à l'étude de l'Univers lointain par les sursauts gamma. En même temps, le satellite Fermi a ouvert la voie à l'étude des sursauts gamma au plus hautes énergies.

De façon plus générale, quatre grandes problématiques se dégagent :

– l'univers comme laboratoire : recherche de signatures directes ou indirectes d'annihilation de matière noire (gamma,  $e^+e^-$ , neutrinos...), tests astrophysiques de physique non-standard (conversion axion-photon, invariance de Lorentz...), étude de la gravitation en champ fort (raies du fer, oscillations rapides, ondes gravitationnelles...), champs magnétiques extrêmes, équation d'état de la matière dense ;

– l'influence des objets compacts sur leur environnement : recherche de diagnostics observationnels des conditions physiques (spectroscopie X, variabilité, campagnes multi-longueurs d'onde...), processus de transport dans les disques d'accrétion et formation des jets (simulations numériques...), méca-

nismes de radiation des pulsars, canaux non-thermiques de dissipation d'énergie (accélération de particules...), rétroaction sur l'environnement (évolution des sources, co-évolution trous noirs-galaxies...);

– les astres explosifs : physique de l'explosion (mécanismes fondamentaux, nucléosynthèse, formation des jets, interaction avec l'environnement), place dans l'histoire de l'univers et utilisation cosmologique (recherche de supernovae de type Ia, de sursauts gamma à haut redshift), signatures non-photoniques (ondes gravitationnelles, neutrinos);

– le rayonnement cosmique : processus fondamentaux d'accélération (simulations, imagerie X fine des chocs...), identification des sources des rayons cosmiques galactiques et extragalactiques (restes de supernovae, sursauts gamma, neutrinos...), propagation dans le milieu interstellaire (diffusion, spallation...), impact sur la chimie et la dynamique (nuages moléculaires, champ magnétique...).

## Forces et faiblesses de la communauté

La communauté hautes énergies est numériquement importante et répartie sur plusieurs instituts (INSU, IN2P3, INP, CEA). Elle est structurée par le GdR PCHE (Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie) et le PIR « Particules et Univers ». L'exercice de prospective a démontré que le GdR PCHE devait évoluer en un programme national tout en maintenant l'interdisciplinarité qui fait sa force. Cette évolution devrait permettre de dynamiser les liens avec les communautés des autres Programmes Nationaux, PCMI (rayons cosmiques, émissions diffuses), PNCG (matière noire, sondes univers lointain, évolution structures), PNPS (disques, jets, nucléosynthèse) et PNST (chocs, plasma).

## Évolutions et perspectives

La communauté astrophysique prépare activement les projets CTA (Cherenkov Telescope Array gamma au sol), Advanced Virgo

(ondes gravitationnelles), SVOM et GFT (Space-based multiband Variable Object Monitor et Ground Follow-up Telescope pour les sursauts gamma) et, à plus long terme, les missions spatiales IXO (International X-ray Observatory) et LISA (ondes gravitationnelles). Il faut noter que l'abandon du projet spatial Simbol-X a pesé sur la communauté qui s'y était fortement investie. L'exploitation des moyens spatiaux existants (XMM-Newton, INTEGRAL, Fermi) doit être poursuivie aussi longtemps que possible. Des actions de R&D pour l'astronomie au MeV et la polarisation haute énergie pourraient déboucher sur une proposition de mission innovante.

## 2.3 PHYSIQUE ET CHIMIE DES MILIEUX INTERSTELLAIRES ET CIRCUMSTELLAIRES

Le milieu interstellaire (MIS) est un acteur essentiel des galaxies, comme source des prochaines générations d'étoiles et témoin des générations passées. L'étude des milieux interstellaires et circumstellaires est donc incontournable pour comprendre la formation et l'évolution des galaxies, celles des étoiles comme celles des systèmes planétaires. Cela implique de comprendre leur structure et leur dynamique, la nature de leurs constituants et leur évolution physico-chimique, ainsi que les nombreux couplages entre processus.

### Faits marquants

Le MIS constitue un laboratoire unique, où la matière peut être étudiée dans des conditions de vide extrêmes, et où de nouveaux phénomènes physiques et chimiques ont été découverts, contribuant ainsi à l'accroissement des connaissances fondamentales. L'INSU a encouragé cette dynamique en structurant une communauté interdisciplinaire de physiciens, chimistes et astrophysiciens autour du programme PCMI. Ce programme a servi de

noyau pour la participation d'équipes françaises à plusieurs réseaux européens. Parmi les avancées les plus marquantes de ces dernières années, on peut noter :

– *les études théoriques menées sur la vapeur d'eau, pour l'utiliser comme sonde de divers environnements* : l'eau est un constituant majeur des glaces, et devient, lors de leur sublimation dans les chocs ou les régions protostellaires, un des principaux réservoirs de l'oxygène. La modélisation précise de la surface d'énergie potentielle pour  $H_2O-H_2$  a permis de calculer des sections efficaces d'excitation collisionnelle avec des méthodes variées pour couvrir une vaste gamme de température. Ces travaux sont en phase avec les programmes d'observation de  $H_2O$  avec le satellite Herschel.

– *les études de la dynamique du milieu interstellaire et de la formation des nuages denses* Les observations révèlent que le milieu diffus est un milieu turbulent, magnétisé, hors d'équilibre mais qui engendre le milieu dense, moléculaire, berceau des étoiles et planètes. Comment s'effectue ce changement radical ? Des simulations numériques MHD ont montré que la convergence de deux flots subsoniques de gaz atomique chaud et dilué suffit à créer, sous l'influence conjointe de la pression dynamique, de l'instabilité thermique, puis de la gravité, des condensations de gaz dense froid pérennes au sein du milieu chaud, dont les propriétés statistiques reproduisent les lois d'échelles observées.

– *la détection de molécules fortement enrichies en deutérium* dans les cœurs denses et froids du MIS, offrant ainsi de nouveaux traceurs de ces régions où se forment les étoiles. L'action combinée de processus en phase gazeuse et solide (glaces) est nécessaire pour atteindre les niveaux d'enrichissement mesurés, ouvrant ainsi un nouveau champ d'investigation des processus hétérogènes à très basse température ( $\sim 10$  K).

– *les observations interférométriques (IRAM Plateau de Bures) des disques proto-planétaires* ont permis d'étudier à haute résolution angulaire leur structure et de montrer l'existence de

cavités internes en gaz et en poussière liées à la formation de planètes ou à la binarité et la présence de gros grains très froids.

– en tirant parti d'observations sur les satellites ISO, puis Spitzer, couplées à des études théoriques et en laboratoire (expérience PIRENEA), un scénario d'évolution des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), les porteurs des bandes d'émission IR, a été proposé. Ces bandes contribuent au spectre des régions de formation stellaire et des galaxies, proches comme lointaines. Les observations obtenues avec le satellite Spitzer ont permis d'approfondir les résultats du satellite ISO, en démontrant l'universalité des signatures du MIS et de la formation stellaire à tous les redshifts.

## Forces et faiblesses de la communauté

Une des forces de la communauté est incontestablement l'accès aux instruments sols (IRAM, bientôt ALMA) et spatiaux (Spitzer, Herschel), qui apportent une couverture spectrale complète des mécanismes de rayonnement (atomes, molécules dont l'eau, poussières, etc.) avec une sensibilité inégalée. La communauté doit se mobiliser pour la préparation des nouveaux instruments (JWST, SPICA, SKA) et contribuer à la mission Gaia.

Un autre atout est le lien fort, indispensable à l'étude des processus physico-chimiques, avec l'astrophysique de laboratoire, dans un cadre interdisciplinaire fortement ancré avec la physique moléculaire, la physico-chimie et la chimie théorique.

La petite taille de la communauté, et la diversité des thématiques astrophysiques peut être perçue comme une faiblesse. Si les activités de simulations numériques progressent, le nombre de chercheurs est encore trop réduit par rapport à d'autres pays européens.

## Évolutions et perspectives

Les nouveaux développements instrumentaux (ALMA, JWST) et théoriques (montée en

puissance des simulations numériques) vont permettre d'aborder dans l'avenir l'étude du milieu interstellaire sous de nouveaux angles. On peut dégager deux grands axes : l'étude de l'évolution de la matière qu'elle soit sous forme d'atomes, molécules ou grains solides, et la compréhension de la dynamique du milieu.

Ces deux axes sont étroitement couplés, comme le témoignent les questions spécifiques qui vont focaliser l'attention des chercheurs de la communauté dans le futur :

– comment évolue la matière interstellaire et circumstellaire? Quelle est la nature de la poussière et quels processus gouvernent son évolution physico-chimique, en particulier pour ce qui est de sa formation et de sa destruction? Quelles signatures spectrales témoignent de cette évolution?

– comment se forment les molécules interstellaires et quel niveau de complexité moléculaire est atteint dans le milieu interstellaire et les régions protostellaires? Les molécules prébiotiques du MIS sont-elles transmises aux matériaux du disque protoplanétaire? Peut-on retracer l'histoire de la matière organique du système solaire?

– les observations révèlent que le milieu diffus est turbulent, magnétisé, hors équilibre, mais qu'il engendre le milieu dense, moléculaire, berceau des étoiles et planètes. Comment s'effectue ce changement radical? Les modélisations et simulations numériques tiennent compte de nombreux couplages non linéaires, mais nécessitent une forte interaction entre théoriciens et observateurs pour être validées. Les mêmes questions sont abordées dans le domaine extragalactique, en commençant avec les Nuages de Magellan où les conditions sont sensiblement différentes de celles dans la Voie Lactée. Cette ouverture devrait renforcer les liens entre communautés galactiques et extragalactiques pour une meilleure compréhension de l'évolution des galaxies.

Les perspectives ouvertes par les dispositifs expérimentaux d'astrophysique de laboratoire et les modèles numériques sont traitées § 3,4 et 3,3.

En conclusion, on peut s'attendre à une progression du rôle charnière que joue l'étude du milieu interstellaire, à l'interface avec les communautés de physique stellaire et planétaire comme avec celle de physique des galaxies.

## 2.4 ORIGINE, STRUCTURE ET ÉVOLUTION DES ÉTOILES ET DES SYSTÈMES PLANÉTAIRES

Les grandes questions de la physique stellaire, structurée par le Programme National de Physique Stellaire, portent actuellement sur l'origine et l'évolution des étoiles et des planètes (conditions initiales de formation des étoiles, structure interne, évolution des étoiles et de leur environnement circumstellaire, formation d'exoplanètes), la spécificité de notre système solaire (physique du Soleil et de notre système solaire, mise en perspective avec d'autres systèmes extra-solaires), mais aussi le rôle des étoiles dans l'évolution des galaxies.

### Faits marquants

– Grâce aux développements instrumentaux de la spectro-polarimétrie (TCFH/ESPADONS et TBL/NARVAL), les champs magnétiques peuvent être étudiés à travers tout le diagramme HR. On a notamment pu mesurer pour la première fois le champ magnétique d'étoiles de faible masse, montrant que leur zone convective globale serait très efficace pour produire le champ magnétique à grande échelle. Ce résultat a de grandes implications pour la théorie des dynamos. Le champ magnétique a également pu être détecté dans les parties internes d'un disque d'accrétion entourant une étoile jeune, montrant une topologie en accord avec les modèles MHD pour propulser les jets qui leur sont associés.

– Les grands relevés des zones de formation stellaire, rendus possibles grâce aux caméras grand champ (TCFH/WIRCAM et MegaCam),

ont permis de confirmer l'universalité de la fonction de masse initiale des étoiles (IMF). La détermination et la comparaison de l'IMF des amas d'étoiles jeunes et des cœurs pré-stellaires (IRAM/MAMBO) ont fourni des contraintes fortes pour les mécanismes physiques de formation stellaire.

– Les interféromètres optiques et infrarouges (VLTI, IOTA et CHARA), en offrant une mesure directe des variations du diamètre apparent des étoiles pulsantes de types céphéides, permettent un étalonnage absolu de la relation période-luminosité et donc une meilleure estimation des distances dans l'Univers local.

– L'exploitation au sol et dans l'espace des nouveaux moyens en astérosismologie connaît un essor remarquable. Les premiers résultats sismologiques de COROT apportent des avancées importantes telles que la découverte de pulsations de type solaire dans les étoiles massives.

– D'un point de vue théorique, la généralisation du formalisme de transport dans les étoiles en rotation est une avancée importante.

Les faits marquants concernant les exoplanètes, l'autre programme phare de COROT, sont décrits § 2,6.

### Forces et faiblesses de la communauté

La physique stellaire, domaine traditionnel d'excellence en France, regroupe une grande variété de thèmes de recherche. L'expertise reconnue de la France touche divers domaines de l'observation et l'instrumentation, dont ceux de la haute résolution angulaire optique et radio, de l'héliosismologie, de la spectrométrie et spectropolarimétrie, des grands relevés infrarouges et sub-millimétriques, mais également de la théorie et modélisation des étoiles. Le vieillissement de la communauté pose cependant la question de son renouvellement et des choix thématiques à faire pour entourer au mieux la mise en place de nouvelles équipes formées aux grands instruments à venir, aux traitements massifs des

données, aux simulations numériques lourdes et/ou à l'instrumentation de pointe. La forte activité de la communauté dans les réseaux européens (FP-5 : *Planets, Clusters*; FP-6 : *JETSET, CONSTELLATION, Molecular Universe*) et l'augmentation rapide du nombre de projets ANR acceptés concernant les thèmes du PNPS est encourageante.

Concernant l'utilisation massive de gros codes numériques, si la France s'est maintenant dotée de moyens de calculs nationaux compétitifs (par exemple le CINES), ainsi que de quelques méso-centres qui répondent efficacement à des besoins spécifiques et plus localisés, il existe cependant un déficit de main d'œuvre pour le développement de « gros » codes numériques (par exemple, d'évolution stellaire, multi-dimensionnels, MHD dans les étoiles ou dans les disques, etc.). La construction de grille de modèles d'étoile (standards et non standards, étendus en terme de masse, métallicité et phases évolutives), nécessaires tant pour l'exploitation des données des grands TGE et de COROT que pour la préparation des nouvelles missions comme Gaia ou PLATO, bénéficierait également d'un meilleur accès à un grand nombre de processeurs.

## Évolutions et perspectives

Les années à venir verront un intérêt particulier de la communauté pour la formation stellaire, le magnétisme, une nouvelle génération de modèles stellaires et l'étude de l'interaction de l'étoile avec son environnement. Une percée supplémentaire est notamment attendue dans le domaine de l'astérosismologie (observations et développements théoriques/modélisation associés), ainsi que dans la compréhension des atmosphères et des environnements circumstellaires des étoiles jeunes, en particulier pour les objets dits froids. Par l'observation des étoiles jeunes, et des disques autogravitants associés – une thématique fortement transverse à l'INSU –, ce sont toutes les théories de la formation des planètes qui pourront être testées par la mesure directe des conditions physico-chimiques à divers stades de leur évolution.

L'accès aux instruments d'observation existants ainsi qu'à ceux progressivement mis en service, tels que VLT/VLTI, COROT, Herschel, ALMA, Gaia, JWST, E-ELT, est au cœur de ces avancées attendues. Il conviendra par exemple de poursuivre le développement de l'interférométrie au VLT jusqu'à la pleine obtention des performances annoncées en imagerie (instruments de seconde génération GRAVITY et MATISSE, VSI, extension du réseau actuel de télescopes auxiliaires), ainsi que l'élargissement de la communauté interférométrique par une démocratisation de l'accès aux données traitées et exploitables scientifiquement. Le bon retour scientifique de missions spatiales en cours (COROT et Herschel), ou futures (Gaia, PLATO) doit être assuré efficacement, notamment par des observations de soutien au sol le cas échéant, mais aussi un support théorique et de modélisation.

La synergie entre modélisation et observations est bien entendu nécessaire et dans ce cadre, on notera les progrès décisifs obtenus dans le cadre de la préparation à COROT, sur des aspects jusqu'alors mal compris des oscillations stellaires (effet de la rotation, mécanismes d'excitation). La préparation de COROT est aussi à l'origine d'une nouvelle génération de modèles d'évolution stellaire multidimensionnels qui cherchent à mieux tenir compte des phénomènes de transport dans les intérieurs stellaires. Le développement de codes de transfert du rayonnement performants a permis de mieux comprendre la chronologie d'évolution des disques avec celle de la formation des planètes. Et pour préparer et interpréter les expériences des grandes installations lasers, de nouveaux codes d'hydrodynamique radiative ont également été développés. Finalement, les résultats de NARVAL et ESPADONS stimulent d'importants efforts de modélisation des effets et de l'origine des champs magnétiques stellaires.

## 2.5 PHYSIQUE DU SOLEIL ET DE L'HÉLIOSPHÈRE, RELATIONS SOLEIL-TERRE

Sous cette dénomination se retrouvent toutes les thématiques s'attachant à décrire les couplages entre le Soleil et une planète spécifique : la Terre. Cela implique l'étude de milieux particuliers liés au Soleil – photosphère et chromosphère, couronne solaire, vent solaire et héliosphère – et aux planètes – magnétosphère, ionosphère et thermosphère – ainsi que l'analyse de tous leurs couplages. Les outils conceptuels sont pour l'essentiel ceux de la physique des plasmas chauds : théories magnétohydrodynamiques et cinétiques, avec une forte insistance sur les mécanismes de génération (dynamo) et transformation (reconnexion) du champ magnétique, d'accélération des particules et de chauffage des plasmas, de transferts radiatifs, de phénomènes non-linéaires, chocs et turbulence. Ces processus jouent un rôle fondamental dans l'organisation et la dynamique de nombre d'environnements astrophysiques : planètes telluriques et géantes, petits corps (comètes en particulier), étoiles, objets compacts et milieux interstellaires. En cela, ce domaine est lié à des thématiques attenantes de l'astrophysique (planétologie, physique stellaire, physique des hautes énergies) ainsi qu'à l'étude des plasmas chauds de laboratoire (projet ITER). Le lien avec les sciences de l'environnement et de l'atmosphère constituent d'autres ouvertures pluridisciplinaires : d'une part, la variation du flux solaire est un des paramètres pouvant influencer les évolutions climatiques ; d'autre part, la variabilité solaire a une influence majeure sur l'état physique de l'environnement spatial, à des échelles temporelles de quelques heures à quelques jours (météo spatiale).

### Faits marquants

Les résultats scientifiques de la discipline soulignent la forte ouverture internationale des équipes, qui sont systématiquement sollicitées

pour des collaborations scientifiques et des contributions instrumentales dans un domaine fortement orienté vers le spatial. Pour de nombreux résultats issus de l'analyse de données, les outils logiciels développés dans les services de bases de données, CDPP, MEDOC, Bass2000, sont déterminants. Le développement de ces actions, souvent concertées entre les équipes et toutes très largement ouvertes à l'Europe et à l'international, est aussi un fait marquant de la décennie. Il place les équipes françaises à un excellent niveau mondial.

*Soleil et héliosphère.* Avec THEMIS (observatoire sol) et des techniques de spectro-polarimétrie multi-raies, les premières déterminations vectorielles du champ magnétique dans les régions actives ont pu être obtenues, offrant des cartes de champ magnétique qui, couplées à des modèles d'extrapolation et d'évolution MHD, ont permis d'établir les topologies magnétiques des structures pré-éruptives et de modéliser leur évolution. L'initialisation et la propagation des perturbations héliosphériques majeures ont pu être analysées quantitativement par une batterie d'instruments et de techniques « remote sensing » et in-situ couvrant l'ensemble du spectre : RHESSI, SOHO, SDO, TRACE, STEREO, radiohéliographe et spectrographes de Nançay. La mission STEREO a aussi permis de réaliser les premières détections de nanopoussières interplanétaires à 1 UA.

*Magnétosphère terrestre.* Avec les missions spatiales CLUSTER (4 satellites, ESA) puis THEMIS (5 satellites, NASA), usant de techniques d'analyses multi-satellites, les échelles caractéristiques spatiales et temporelles (processus de reformation) des chocs sans collision ont été établies, avec le soutien de simulations numériques. L'anisotropie de la turbulence dans les milieux magnétisés a été mesurée. Le rôle respectif de la reconnexion, de la micro-turbulence et des instabilités de grandes échelles dans les transferts de matière et de flux au travers des frontières magnétiques a été caractérisé. Le phénomène – central – de sous-orage magnétique est décrypté, confirmant son aspect multiforme, éloigné de la vision standard de la reconnexion en un point unique. En couplant des observations

radar sol (SUPERDARN) aux observations satellites, les modalités d'injection de plasma par reconnexion ont été précisées. Avec DEMETER, des effets anthropiques spectaculaires sur la dynamique des ceintures de radiation ont été mesurés.

*Environnements planétaires.* Dans le cadre de l'étude des plasmas planétaires, les caractéristiques de l'interaction vent solaire/Mars et Vénus sont établies, y compris une évaluation de l'évaporation atmosphérique associée. Pour Jupiter, la modélisation des processus de rayonnements radio prend maintenant en compte les processus associés d'accélération d'électrons par des ondes d'Alfvén. Pour Saturne, l'effort porte sur la dynamique particulière de cette magnétosphère en rotation rapide, à fortes populations de neutres.

*Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace.* Plusieurs équipes françaises sont aujourd'hui fortement impliquées dans les activités scientifiques encore en émergence il y a quelques années. Il faut noter en particulier le développement de techniques pour reconstruire le spectre solaire EUV et UV, principal terme de forçage solaire pour l'ionosphère et la thermosphère solaires et sa variabilité, et des études des perturbations de la thermosphère induites par l'impact de la variabilité du vent solaire sur la magnétosphère terrestre.

## Évolutions et perspectives

La prospective scientifique du domaine peut s'énoncer simplement : dans leur très grande majorité, les processus plasmas et/ou d'interaction et de couplage locaux dans les milieux ionisés sont connus, décrits et quantifiés. On dispose aussi de codes numériques qui commencent à en rendre compte fidèlement. L'aspect « système » et la conjugaison des processus multi-échelles reste *le* mystère. L'émergence des champs magnétiques solaires et leur évolution, le chauffage de la couronne solaire, l'accélération des particules solaires, l'efficacité d'accélération et de rayonnement d'un choc, la puissance dissipée lors d'une reconnexion

magnétique, sa partition entre rayonnement et accélération, la construction d'un spectre turbulent et l'émergence de structures non-linéaires sont issus de mécanismes qui ne doivent pas se concevoir comme de simples sommations de processus élémentaires. La communauté s'attelle à ces difficultés avec de nouveaux outils d'observations : projets MMS (« super » CLUSTER de la NASA, capable d'une résolution temporelle sans précédent) et CrossScale (proposé mais non retenu au 1<sup>er</sup> appel d'offre Cosmic Vision) ; Solar Orbiter qui permettra d'obtenir les premières mesures in-situ combinées avec des observations d'imagerie à haute résolution spatiale et à une vision hors écliptique du soleil et qui, couplé à Solar Probe et à Bepi Colombo, donnera un extraordinaire ensemble de mesures de la couronne et de l'héliosphère interne. Pour les moyens sol, les initiatives concernent l'après THEMIS (projet EST) et les futurs interféromètres radio (LOFAR, FASR).

Dans le domaine de la planétologie, outre Bepi Colombo maintenant en phase d'implémentation à l'ESA, le projet EJSM mail nicole pourra permettre de disposer, enfin (horizon 2025...), d'une gamme satisfaisante et complète de mesures plasma/champ électromagnétique à Jupiter.

À plus court terme, le projet CNES PICARD sera l'occasion d'accroître le poids de la communauté dans des aspects de surveillance solaire de long terme, avec des mesures fines des paramètres fondamentaux du Soleil tels que l'irradiance et ses variations et donc de possibles implications de la communauté dans l'étude du forçage éventuel du climat par le Soleil et ses variations. Il s'agit d'une forme d'élargissement thématique qu'on retrouve sur le projet TARANIS, qui étudiera les processus fugitifs aux interfaces ionosphère/atmosphères (Sprites, Elfes...) récemment découverts et mal décrits.

Les efforts instrumentaux doivent être épaulés par des développements conceptuels et de simulations numériques d'ampleur équivalente. Sur le front de la théorie, le verrou est bien souvent celui de la physique non-linéaire et de la turbulence, ce qui est partagé par beau-

coup de domaines. Pour le numérique, la communauté française commence à disposer de simulations 3D et/ou multi-échelles à mailles adaptatives du meilleur niveau, précieuses puisqu'un des atouts du domaine est de pouvoir allier des observations de haute précision avec des modèles théoriques et des simulations numériques sophistiquées, pour une approche quantitative complète des problèmes sans trop d'équivalents en astrophysique.

## 2.6 ORIGINE, ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE, STRUCTURE ET DYNAMIQUE DE SES OBJETS ET DE LEURS ENVELOPPES

La planétologie moderne s'est développée dès les années 60 avec l'exploration des sondes spatiales, en s'établissant comme discipline autonome à l'interface entre différentes disciplines : astronomie, sciences de la Terre, météorologie. La dominance américaine (et, dans une moindre mesure, russe) sur cette discipline, très forte jusqu'aux années 80, a été tempérée depuis par l'exploration spatiale européenne et japonaise. L'impact de la recherche française dans la discipline est excellent, sans doute au deuxième rang derrière les États-Unis. On pourrait même dire que celle-ci est d'une certaine façon mieux reconnue à l'international qu'au niveau national, où la vision transdisciplinaire, au-delà de l'astronomie, des activités de planétologie n'est pas toujours bien comprise.

Les grandes questions structurant aujourd'hui la planétologie peuvent se décliner en trois thèmes fédérateurs, qui incluent également les questionnements relevant des exoplanètes :

- la formation des systèmes planétaires
- la structure et l'évolution des corps planétaires
- les environnements planétaires primitifs.

Ces questions se retrouvent dans les thématiques plus spécifiques à chaque objet ou

groupe d'objets d'étude dans le système solaire et au-delà.

### Faits marquants

Dans la période récente (2004-2009), ces questions ont pu être abordées dans différents domaines :

– *le système de Saturne* a bénéficié de l'arrivée de la sonde Cassini (en orbite) et de l'atterrisseur Huygens (arrivé le 14 janvier 2005). Des découvertes remarquables ont été obtenues par cette mission : sur Titan en premier lieu, dont le système d'écoulement fluvial (de méthane) a été mis en évidence, avec un cycle « méthanologique » analogue au cycle hydrologique terrestre, qui lie les aspects météorologiques, chimiques et géologiques de ce satellite. L'observation de « geysers » sur le satellite Encelade, et la mesure directe de la composition des éjectas par l'orbiteur Cassini, ont permis des mesures remarquables. Des découvertes importantes concernent aussi les anneaux de la planète (composition, origine, découvertes de nouveaux anneaux) et la géologie des autres satellites de glace.

– *Vénus* était restée longtemps délaissée par l'exploration spatiale, particulièrement pour l'étude de son atmosphère ; la sonde de l'ESA Venus Express a permis une moisson de découvertes scientifiques. La compréhension quantitative des mécanismes de super-rotation et d'effet de serre a fait de gros progrès ; la détection en infrarouge de la surface de Vénus, avec la mise en évidence d'un volcanisme récent, est un autre résultat marquant. Enfin la mesure fine des paramètres de la haute atmosphère (émissions de O<sub>2</sub>, de NO, détection et mesure de OH) donne une vision renouvelée des régions d'interface atmosphère-exosphère, importantes pour la dynamique de toutes les planètes.

– *Mars* reste un objet très étudié dans la programmation des agences spatiales avec pas moins de 5 sondes en activité en 2010 et plusieurs en préparation. La grande question débattue reste la durée de la phase humide initiale ayant conduit à la formation d'argiles

(détectées par Mars Express), et la présence de sites accessibles témoins de ces premiers âges.

– *la floraison des détections d'exoplanètes* par des détections en vitesses radiales, mais aussi en occultation (COROT, qui a permis la première détection d'une « super-Terre » près de son étoile), et en détection directe (VLT/NACO), font de ce domaine un des plus actifs à la frontière entre physique stellaire et planétologie. Ces études, longtemps cantonnées à quelques mesures de paramètres (masse, rayon, orbite), entrent aujourd'hui dans le domaine de la planétologie physique, avec les premiers spectres en spectro-photométrie obtenus sur les planètes à transit, et la comparaison possible à des modèles.

– *dans le domaine de la simulation numérique*, les résultats marquants ont été la construction d'un modèle reproduisant le bombardement tardif, qui permet de comprendre comment la fin de la construction des planètes, en déstabilisant la ceinture de Kuiper, injecte jusque dans le système solaire interne de nombreux corps entrant en collision avec les planètes déjà formées. Les modélisations dynamiques du système solaire et le comportement chaotique des orbites des planètes sont un autre résultat marquant qui aura des implications, au-delà des simulations du système solaire, pour la compréhension des systèmes d'exoplanètes.

## Évolutions et perspectives

La découverte de planètes extrasolaires (500 environ à ce jour) permet d'ores et déjà d'obtenir des informations physiques sur ces systèmes. L'implication d'équipes de planétologie dans ce domaine (souvent tiré par des astronomes originaires de la physique stellaire) doit permettre d'enrichir notre compréhension de leur physique par l'utilisation de modèles, en particulier pour les atmosphères planétaires, affinés par des décennies de la confrontation aux observations. La modélisation des atmosphères, en relation avec la spectroscopie moléculaire avec qui la planétologie a tissé des liens forts, est un enjeu des questions émer-

gentes qui doivent permettre des avancées dans les prochaines années.

L'origine du système solaire reste un domaine d'étude très actif, renouvelé par la mise au point de simulations plus précises, grâce aux développements de la puissance des calculateurs. L'étude des astéroïdes (rocheux dans la ceinture principale, glacés dans la ceinture de Kuiper), longtemps considérés comme des résidus informes de la formation du système solaire, se révèle aujourd'hui d'une richesse incomparable : familles d'astéroïdes, relations astéroïdes/météorites, dynamique des disques d'accrétion, mécanismes de collisions, relations comètes-astéroïdes, etc. Les missions spatiales en cours (Rosetta en particulier) doivent donner des petits corps du système solaire une nouvelle compréhension qui diffusera dans nos connaissances du système solaire et de sa formation.

La mission Herschel et la mise en service d'ALMA dans les prochaines années vont permettre des observations nouvelles et détaillées dans le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, tant des planètes que des comètes.

L'étude des planètes telluriques qui se poursuivra dans la décennie 2010 reste focalisée sur l'évolution primitive des planètes et les conditions d'apparition de la vie, mais des questions plus globales se posent sur l'évolution planétaire (intérieur/surface/atmosphère), impliquant de modéliser conjointement l'apparition ou la disparition d'une dynamo, de préciser le type de volcanisme, et d'en étudier les effets sur la composition atmosphérique. La thématique des interactions intérieur/surface/atmosphère/exosphère, présente également dans les études de Titan et d'Encelade avec Cassini/Huygens, est au centre des problématiques actuelles d'étude du (des) système(s) solaire(s).

Les planètes géantes voient un regain d'intérêt, avec les études en cours de Cassini à Saturne (mission étendue jusqu'en 2017) et la préparation de la mission EJSM vers le système jovien, mais aussi dans la perspective d'un étalonnage des observations des exoplanètes par

rapport à ces objets mieux connus. La question de l'origine des planètes géantes (et de leurs satellites) est en effet une question clé pour comprendre la situation des exoplanètes, et particulièrement des « Jupiter chauds », dont l'évolution orbitale est manifestement très différente de celle du système solaire.

Le cas de l'exobiologie dans la planétologie moderne mérite d'être mentionné ; longtemps restée très spéculatif et peu contrainte, la connaissance de l'évolution planétaire (incluant la proto-Terre) permet aujourd'hui de poser des questions plus pertinentes sur les conditions générales d'apparition et du maintien de la vie sur une planète, et les possibilités de détection par sonde.

En conclusion, la planétologie doit aujourd'hui être considérée au centre d'interdisciplinarités qui en font un domaine en pleine évolution. Quelques exemples en seraient : milieu interstellaire – comètes – atmosphères planétaires ; formation des systèmes stellaires et exoplanètes, migration planétaire, transfert radiatif dans les exoplanètes ; intérieurs planétaires, magnétisme planétaire, tectonique, évolution atmosphérique, proto-biologie ; simulations dynamiques dans les disques d'accrétions, formation des planètes, évolution des disques.

Ces développements, toujours liés à des missions spatiales spécifiques, mais aussi aux méthodes de simulation et aux observations sur les télescopes au sol (VLT, ALMA, etc.), doivent se poursuivre dans les prochaines années. La planétologie est aussi aujourd'hui la science qui permet de fonder le lien entre astronomie observationnelle et physique de laboratoire, grâce aux échantillons obtenus sur quelques objets du système solaire et de grains cométaires.

## 2.7 SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE

Les évolutions des dernières années ont conduit à élargir notre vision de cette théma-

tique. Elle regroupe les problématiques de la mesure de l'espace et du temps et de la construction de repères dans l'espace-temps ; la rotation, la forme et le champ de gravité de la Terre et ceux des autres corps du système solaire ; le mouvement des corps naturels et artificiels dans le système solaire ; les lois fondamentales de la physique, en particulier la relativité et l'interaction gravitationnelle, sur des échelles allant du micron à la taille du système solaire ; certains aspects des ondes gravitationnelles. Elle combine théorie, modélisation, traitement de données, expériences de laboratoire, moyens d'observation sol, missions et infrastructures spatiales. Elle est fortement interdisciplinaire, étant partagée avec les sciences de la terre, la physique, l'ingénierie, la physique des particules, le spatial. Elle est aussi le support d'un volet important de services d'observation.

La création en 2010 de l'Action Spécifique « Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie » GRAM par le CNRS et le CNES, qui avait été recommandée par le colloque de prospective, doit permettre d'améliorer la coordination entre les laboratoires d'astronomie et avec ceux des autres instituts du CNRS et des autres organismes concernés par ce domaine.

### Faits marquants

Parmi les faits marquants récents on peut relever :

- une contribution majeure dans la réalisation de l'ICRF2, le nouveau repère de référence céleste adopté par l'Union Astronomique Internationale en 2009. Les équipes françaises en interférométrie à très longue base (VLBI) ont été à l'origine du choix des 295 radiosources de définition de ce repère ;

- le choix des éphémérides planétaires et lunaire numériques INPOP, développées depuis 2003 et indépendantes des éphémérides américaines, comme éphémérides planétaires pour la navigation de la mission Gaia et le traitement des données obtenues au cours de la mission ;

– l'expérience de transfert de temps par lien laser T2L2 sur la mission Jason 2 en 2008. Elle promet des performances meilleures par un ordre de grandeur que celles des systèmes existants, et fait l'objet d'une intense étude aux niveaux national et international ;

– le poids très important pris par les fontaines atomiques françaises. Depuis 3 ans elles fournissent à elles seules la moitié des mesures permettant d'établir la référence internationale de la seconde, et leurs performances en font 3 des 4 meilleures horloges au monde.

Plus généralement, les dernières années ont été marquées par la montée en puissance de l'aspect physique fondamentale de cette thématique. Cela a renforcé le volet spatial des activités, en complément des moyens existants de la géodésie spatiale, et a contribué à resserrer les liens entre les disciplines, car les tests des lois fondamentales font appel à des mesures à la limite du possible dans tous les domaines. Le GRAM doit faciliter la collaboration et la coordination au sein de cette communauté, en complément des structures plus ciblées existantes, et doit donc à terme jouer le rôle de Programme National pour la thématique.

## Forces et faiblesses de la communauté

Cette thématique s'appuie sur des activités historiques d'excellence de l'astronomie française, sur des points forts de la science française en développement rapide, tel les atomes froids, sur des aspects majeurs de la politique nationale portés par des agences spécifiques (CNES, DGA, LNE, ONERA...). Les équipes françaises sont généralement bien constituées, certaines sont de taille importante par rapport à l'échelle internationale, elles sont bien présentes dans les structures internationales, et leurs moyens techniques sont de pointe.

La forte interdisciplinarité de cette communauté est une richesse, mais elle nécessite une vigilance de la part des laboratoires et des tutelles pour assurer sa cohérence scientifique globale et l'adéquation des ressources, en

évitant les problèmes que rencontre souvent le soutien aux activités aux frontières. Le GRAM pourra être un support pour la visibilité d'ensemble de la thématique, dans la mesure de l'engagement des tutelles.

On peut identifier deux points spécifiques de difficulté actuels :

– les équipes de télémétrie laser du site d'observation du Plateau de Calern subissent de nombreux départs à la retraite, ce qui remet en question la continuité d'une partie des activités, notamment la station laser mobile. Ce problème peut être relié à la question du développement du site d'observation de Tahiti, où l'implantation de stations VLBI et laser modernes aurait un grand intérêt. Ce sujet doit certainement être traité en concertation avec les sciences de la terre ;

– la montée en puissance des expériences spatiales de physique fondamentale a nécessité un long processus de développement des relations avec les agences spatiales et avec l'industrie. Il y a aujourd'hui un besoin clair de structuration des moyens de la communauté scientifique applicables à la physique fondamentale spatiale, en capitalisant sur cette expérience, pour maximiser à l'avenir la visibilité et l'impact de cette communauté.

## Évolutions et perspectives

À court terme la communauté devra assurer l'exploitation des missions spatiales en cours, notamment T2L2 et GOCE (champ de gravité) et la préparation des missions engagées, Gaia (astrométrie, système solaire, physique fondamentale), PHARAO/ACES (temps/fréquence, redshift gravitationnel) et MICROSCOPE (principe d'équivalence).

À plus long terme les grandes questions déjà identifiées gardent toute leur pertinence. Pour le système de référence céleste l'exploitation des résultats de Gaia sera capitale, devant conduire à un repère optique meilleur que l'ICRF actuel. Pour la métrologie temps/fréquence l'avenir passe par le développement d'horloges basées sur des transitions optiques,

avec le but à terme de redéfinir la seconde, ce qui nécessite aussi le développement de nouveaux liens permettant de comparer ces horloges ultra-précises à distance. Pour la géodésie spatiale l'objectif est un système mondial d'une précision millimétrique. Ces évolutions mènent vers un avenir où les références spatio-temporelles fondamentales seront basées sur des observations et des infrastructures spatiales, et diffusées vers la Terre ou dans le système solaire en tant que de besoin. Le système européen de navigation par satellites Galileo constituera un pas sur ce chemin. Les tests de la physique fondamentale, au-delà des missions mentionnées, se développeront par des expériences de laboratoire déjà engagées, par le développement des senseurs inertiels à interférométrie atomique et par la proposition d'instruments et de missions permettant de sonder la gravitation et d'autres effets dans le système solaire. La détection d'ondes gravitationnelles, par l'observation de pulsars ou par les interféromètres optiques, fait appel aux mêmes bases techniques et théoriques et fait donc aussi partie des perspectives. Le positionnement de cette communauté dans le programme Cosmic Vision de l'ESA est un enjeu de taille, avec la mission LISA, l'instrument « Gravity Advanced Package » GAP pour la mission EJSM, et de nouvelles propositions de missions dans le cadre de l'appel Cosmic Vision 2 en 2010.

## 3 – LES OUTILS DE L'ASTROPHYSIQUE

### 3.1 INSTRUMENTATION

Le développement instrumental est un des points forts, reconnu sur le plan international, de la communauté astrophysique française. La moitié des projets proposés dans les thématiques « Astrophysique » et « Système Solaire » en réponse à l'appel d'offre « Cosmic Vision 2015-2025 » lancé en 2007 par l'ESA éma-

naient d'Investigateurs Principaux (PI) français ; la moitié des instruments VLT/VLTI (hors ceux développés par l'ESO) étaient, ou sont, à PI français, alors que la part française dans ces agences n'est que de l'ordre de 20 %. Ceci témoigne des capacités d'initiative, s'appuyant sur de vigoureux programmes de R&D, et des capacités de maîtrise d'œuvre et de réalisation, de notre communauté.

Les développements instrumentaux se font essentiellement dans le cadre des grandes infrastructures internationales, sous contrôle des agences (CNES, ESA, ESO, NASA, etc.) qui les gèrent. La discipline participe également à de nombreux projets « Astroparticules » en collaboration avec des laboratoires de l'IN2P3. Sur la vingtaine de laboratoires (UMR) de la discipline, la plupart participent aux développements instrumentaux au sol, et un tiers environ au développement de projets spatiaux. Les grands projets les plus récents de la discipline (par exemple VLT/VLTI, Planck et Herschel, etc.), ont eu de forts effets structurants pour l'ensemble des laboratoires impliqués : équipement en moyens lourds de réalisation et d'intégration, méthodes de gestion de grands projets, développements de compétences propres au traitement, archivage et mise à disposition des données, etc.

Mais le contexte des grandes infrastructures de la discipline continue à évoluer : les projets sont moins nombreux, mais de plus grande envergure, et certains projets spatiaux se font maintenant avec une participation renforcée des industriels, ce qui modifie le rôle du secteur académique. Ceci a des conséquences sur les plans de charge des laboratoires, suspendus aux décisions liées aux grands programmes des agences, tel Cosmic Vision ou l'E-ELT, et sur les métiers, qui doivent évoluer vers davantage de technicité et de spécialisation, dans un contexte de renforcement des aspects internationaux et de management. Le poids des phases d'études, souvent compétitives, même au niveau national, devient de plus en plus important, et nombreuses sont celles qui ne sont pas suivies de phases de réalisation. Le rôle de la R&D en est renforcé, ainsi que les besoins en spécialistes de la ges-

tion technique des projets et en chercheurs instrumentalistes lorsque les projets sont finalement sélectionnés.

Le contexte programmatique a également évolué : apparition de l'ANR en France, rôle de plus en plus important des programmes européens successifs du PCRD, etc. Ces programmes offrent des moyens supplémentaires et sont bien adaptés aux actions de R&D, mais sont par nature non pérennes, ce qui peut poser des difficultés pour les développements instrumentaux qui s'inscrivent dans la durée. Enfin, rappelons également le rôle important joué par le programme ASTRONET pour l'établissement d'une feuille de route européenne des infrastructures de recherche.

Les priorités nationales pour les nouveaux projets ont été établies au cours du colloque de prospective de 2009 et reprennent les priorités européennes, tout en les déclinant avec les domaines d'excellence nationaux en instrumentation. Ainsi, les priorités pour les grands investissements sont l'E-ELT et son instrumentation, pour lequel des choix instrumentaux importants restent à faire, puis le projet CTA. Le projet NOEMA d'extension de l'interféromètre millimétrique du plateau de Bure à l'IRAM est en première priorité pour les projets « moyens », suivi du projet d'extension du VLTI et de la construction de l'instrument VSI, et enfin, il est recommandé de développer le spectro-polarimètre SPIROU pour le TCFH, et un spectrographe multi-objet grand champ pour l'accompagnement scientifique de Gaia. Notre communauté doit également se préserver la possibilité de participer, si l'occasion se présente, à des projets américains, au premier rang desquels le LSST, ou dans une moindre mesure BigBOSS, CCAT, ou d'autres. Enfin, il faut accompagner le développement des projets majeurs du futur, comme SKA et EST, et soutenir l'étude de l'instrument Imaka.

### 3.2 BASE DE DONNÉES ET ARCHIVAGE MASSIF

L'astronomie développe depuis longtemps un ensemble d'archives et de services en ligne qui sont utilisés quotidiennement par la communauté internationale, et c'est une discipline pionnière dans l'évolution très significative des méthodes de recherche permise par la mise à disposition des données scientifiques. Les données couvrent l'ensemble de la chaîne de recherche, des données d'observation, conservées et mises à la disposition des scientifiques dans les archives d'observatoires, jusqu'aux résultats publiés dans les journaux, en passant par des bases de données de compilation ou des services qui mettent en ligne des données de simulation, ou permettent de faire tourner des modèles à la demande.

L'astronomie a immédiatement tiré parti de la mise en œuvre du Web, développant des services en ligne et des liens entre ces services, avec un apport majeur du Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS). L'étape suivante, depuis 2000, est la mise en place progressive de l'Observatoire Virtuel (OV) astronomique, qui a pour objectif de donner à tous les chercheurs un accès transparent à l'ensemble des données de la discipline. Le développement est coordonné par l'*International Virtual Observatory Alliance* (IVOA), le travail étant réalisé par des projets répartis autour du monde, et ensuite implémenté dans les centres de données pour ouvrir l'accès à leurs ressources en ligne dans le cadre de l'OV. L'OV et la mise à disposition des données ont été identifiés en 2008 par la Feuille de Route ASTRONET comme l'une des infrastructures majeures de l'astronomie, en complément des télescopes au sol et spatiaux.

La France a joué un rôle moteur dans le développement de l'OV, et plusieurs équipes françaises ont participé dès l'origine aux projets européens obtenus dans différents appels d'offre pour soutenir le programme (plusieurs d'entre eux sont ou ont été coordonnés par la France). L'*Action Spécifique Observatoires*

*Virtuels France* (ASOV), créée en 2004 sur la recommandation du précédent colloque de prospective, coordonne les activités OV en France et est membre de l'IVOA.

L'OV astronomique passe progressivement, au niveau international, en phase opérationnelle. On voit aussi émerger des projets où les équipes françaises sont leaders ou très actives dans des disciplines voisines, la physique héliosphérique et la planétologie, qui ont également obtenu des soutiens européens. Des liens existent également avec les développements en physique atomique et moléculaire (projet VAMDC piloté par la France) grâce à la force des activités pluri-disciplinaires dans le domaine de la physico-chimie d'intérêt astrophysique.

La France a développé au fil du temps un réseau de centres de données disciplinaires : le CDS, labellisé en 2008 Très Grande Infrastructure de Recherche, pierre angulaire de l'ASOV ; BASS 2000 et MEDOC, pour les aspects sol et spatiaux des données solaires ; le CDPP, Centre de Données de la Physique des Plasmas. Il faut citer également le centre d'expertise Terapix pour le traitement des données grand champ, et le JMMC pour le traitement des données interférométriques. L'émergence du concept d'OV et les actions de sensibilisation menées par l'ASOV ont produit une floraison de nouveaux acteurs et de services qui mettent en ligne de l'information souvent plus focalisée. On en trouve dans pratiquement tous les OSU à composante astronomique, et plusieurs établissements mutualisent des moyens pour ces développements.

Les enjeux sont, dans l'esprit des recommandations d'ASTRONET, de pérenniser les centres de données et les services, d'une part, et les compétences OV et leur coordination européenne et internationale, d'autre part, ce qui nécessite de trouver des financements au niveau national et au niveau européen. L'une des actions majeures dans la phase actuelle du projet est d'assurer la formation des utilisateurs à l'utilisation des fonctionnalités avancées de l'OV.

### 3.3 SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Le calcul intensif est devenu un outil indispensable pour la plupart des thématiques astrophysiques. C'est à la fois un moyen de mener des études théoriques, et un outil pour interpréter et valoriser les observations. De grands défis scientifiques qui nécessitent l'utilisation du calcul intensif se retrouvent dans tous les domaines décrits § 2. Ils sont résumés ci-dessous :

– *la cosmologie et la formation des grandes structures* (PNCG), domaine dans lequel les simulations ont fait des progrès considérables, et permettent maintenant de traiter tout l'Univers observable, en commençant à distinguer les amas de galaxies. Il faut citer pour ce thème et le suivant l'apport du projet Horizon ;

– *la formation et l'évolution des galaxies, l'histoire de la formation des étoiles* (PNCG). Les simulations sont essentielles pour mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies, et accompagner les grands relevés de population de galaxies à toutes longueurs d'ondes et à toutes époques, remontant jusqu'au Big Bang ;

– *l'étude des astres condensés et des trous noirs, physique relativiste* (PCHE). L'étude des astres compacts et de la matière condensée nécessite de résoudre les équations relativistes. Il faut citer ici le logiciel LORENE. L'étude des disques d'accrétion autour d'étoiles jeunes et de trous noirs (instabilités, accrétion, éjection) est un autre objectif important pour les simulations dans ce domaine ;

– *le calcul et la simulation des processus moléculaires* (PCMI, PNP). La description des processus moléculaires dans les milieux interstellaires et circumstellaires et les atmosphères planétaires est devenue de plus en plus complexe, intégrant progressivement toutes les composantes du gaz et les interactions dans celui-ci, et faisant appel aux méthodes de calcul quantique de la physique moléculaire et de la chimie théorique ;

– *la dynamique et la fragmentation du milieu interstellaire, la formation des cœurs pré-stellaires* (PCMI, PNPS). Afin d'interpréter

les observations de plus en plus détaillées du processus de formation des étoiles, les simulations numériques doivent couvrir une large gamme d'échelles (de plusieurs centaines de parsecs à une fraction d'unité astronomique), et inclure des processus variés (gravité, champ magnétique, transfert de rayonnement, chimie hors équilibre) ;

– *la formation et évolution du Soleil et des étoiles, interactions Terre-Soleil* (PNST, PNPS). La dynamique, la formation et l'évolution des étoiles, la propagation du vent solaire, son interaction avec la magnétosphère terrestre et la dynamo terrestre, sont liées à la physique des plasmas chaud et froid, et à leurs approximations fluides. Ces phénomènes sont fortement non linéaires et turbulents, et nécessitent un approche numérique lourde ;

– *la formation des planètes et systèmes planétaires* (PNP). Les scénarios de la formation des planètes font apparaître différentes étapes de nature très différente (formation des cœurs solides, des planètes géantes, interactions de marée planètes – disques), et les codes et techniques utilisés font appel à une large gamme de compétences.

Pour l'ensemble de ces thématiques, l'accès à une grande puissance de calcul permet le raffinement des modèles physiques et l'augmentation de la résolution numérique, qui est un enjeu particulièrement important pour de nombreux champs de la recherche. Pour certaines thématiques, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à un grand nombre de processeurs (plusieurs centaines à quelques milliers) sur des durées pouvant parfois atteindre la semaine, voire le mois.

Les ressources en calcul utilisées sont à la fois les moyens de calcul intensifs locaux (serveurs, grappes de serveurs), régionaux (mésocentres), et centralisés (centres nationaux et internationaux). Il faut noter que ces dernières années ont enfin vu l'émergence d'une infrastructure claire et solide pour le calcul intensif en France, organisée en pyramide avec les moyens locaux et régionaux à la base, puis les moyens nationaux, et enfin au sommet les moyens européens, grâce à la création du

GENCI qui, entre autres, assure un financement pérenne et de bon niveau pour les moyens nationaux, et au projet européen PRACE.

### 3.4 ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE

L'astrophysique de laboratoire se définit comme l'ensemble des activités au laboratoire (expérimentales ou théoriques) dédiées à des problématiques astrophysiques. L'apport de cette activité à l'analyse des données en astronomie et en planétologie est essentiel. Elle a connu un développement notable depuis une dizaine d'années et la communauté française a acquis dans ce domaine une visibilité internationale forte. Son rôle devrait croître avec le développement d'observatoires de plus en plus sophistiqués au sol et dans l'espace qui offrent une couverture complète du spectre électromagnétique. De plus, les sondes spatiales orbitant autour des objets du système solaires sont de véritables laboratoires volants, capables de prélever et analyser in situ des échantillons solides et gazeux, voire de les ramener sur Terre. Enfin, la complexité de certains phénomènes astrophysiques (par exemple les nanoparticules du milieu interstellaire, ou la réactivité à très basse température) conjuguée à la difficulté de recueillir des informations autrement que par télédétection, a rendu nécessaire le développement d'études en laboratoire.

L'astrophysique de laboratoire se décline donc selon plusieurs modalités : i) la détermination (expérimentale ou théorique) de données fondamentales (spectroscopie, réactivité, équation d'état, etc.), ii) la simulation des processus à l'œuvre dans les milieux astrophysiques (chocs et jets stellaires, évolution de la matière, etc.), iii) la fabrication de matériaux analogues aux matériaux astrophysiques et la mise en œuvre de procédés d'analyse toujours plus performants. Elle fait appel à des expériences dédiées et repose beaucoup sur des approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique avec d'autres domaines de la physique et de la chimie. Certaines de ces

études ont une forte interface avec les sciences de la Terre et de l'atmosphère. Les activités d'astrophysique de laboratoire sont aussi bien intégrées dans l'Observatoire Virtuel avec le développement de standards pour rendre les bases de données de physique interopérables.

Cinq thématiques peuvent être identifiées : (1) Spectroscopie moléculaire et des solides. Le besoin en données de spectroscopie des gaz comme des solides est toujours d'actualité, notamment dans le domaine submillimétrique, exploré par le satellite Herschel lancé en 2009. (2) Plasmas chauds, dynamique et propriétés microscopiques de la matière dense et chaude, en liaison principalement avec la physique stellaire. (3) Études des processus microphysiques, pour comprendre comment la matière interstellaire évolue et comment se forment les matériaux détectés, et enrichir les modèles des objets et milieux astrophysiques. On peut rattacher les processus nucléaires à cette thématique même si les études sont menées dans des laboratoires IN2P3 pour ce dernier point. (4) Matière extraterrestre : analyse *in situ* et analogues/simulations en laboratoire. (5) Métrologie temps/fréquence.

L'INSU fournit un soutien et une coordination de l'astrophysique de laboratoire par l'intermédiaire des programmes nationaux (PCMI, PNP, PNPS). Des GDR spécialisés (par exemple SPECMO, DYNAMO) complètent le dispositif. Le PIR OPV (devenu EPOV) joue aussi un rôle pour le financement de certaines expériences. Toutefois, le budget limité de ces programmes ne leur permet pas de mettre en place une véritable politique incitative en terme de développements instrumentaux. Leur rôle est d'inciter à la formation d'équipes pluridisciplinaires, de structurer les activités, et de soutenir le fonctionnement des expériences, le plus souvent sur une base pluri-annuelle. Au cours du temps, des réseaux de collaboration impliquant des équipes françaises et étrangères se sont constitués.

Les équipes relèvent du périmètre de l'INSU, de l'INP, de l'INC et de l'INS2I principalement. Les réseaux permettent une « immersion » des équipes pratiquant l'astrophysique de laboratoire dans des laboratoires se situant

dans le « cœur de métier » et facilitent ainsi la circulation des idées et des techniques. Cependant, il faut noter que la dispersion géographique et institutionnelle qui résulte du fonctionnement actuel de l'astrophysique de laboratoire est un handicap pour sa visibilité par les disciplines constituées ainsi que pour les recrutements par les instances disciplinaires. La définition de critères de recrutement spécifiques aux activités interdisciplinaires comme l'astrophysique de laboratoire, ainsi que la formation en amont par des thèses interdisciplinaires, pourraient constituer de bons remèdes à ces difficultés.

### 3.5 SERVICES D'OBSERVATION

Les observations de phénomènes naturels sur de longues périodes de temps sont un dispositif incontournable de toutes les disciplines de l'INSU, et la communauté des Sciences de l'Univers est investie d'une « mission de service » pour les mener à bien. Les Services d'Observation sont labellisés par l'INSU, avec trois sections, astronomie, terre interne, et surface et interface continent/océan/atmosphère, et leur liste est régulièrement remise à jour.

Les Services d'Observation en astronomie sont définis pour l'essentiel par regroupements fonctionnels qui suivent le chemin d'acquisition et de distribution des données, avec aussi des services spécifiques pour la métrologie de l'espace et du temps et la surveillance solaire et les relations Soleil-Terre. Ce sont :

- métrologie de l'Espace et du Temps
- instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux
- stations d'observation nationale et internationales
- grands relevés et sondages profonds
- centres de traitement et d'archivage des données
- surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre.

Les Services d'Observation, qui permettent de mettre en œuvre les moyens d'observation, sont l'une des forces de la discipline, ainsi que les personnels du corps des Astronomes et Physiciens (CNAP), dont les missions, en symbiose avec la mission de l'INSU, combinent recherche, enseignement et tâches de service dans les services labellisés. Leurs compétences scientifiques assurent la pertinence des services, et une part de leur évaluation repose sur leur apport à ceux-ci.

Le groupe de travail de l'exercice de prospective chargé de l'examen des Services d'Observation a noté que la structuration en grands types fonctionnels demeure bien adaptée aux missions de service en Astronomie-Astrophysique. Il recommande de renforcer la coordination des services au niveau national et local, avec entre autres une structure spécifique au niveau de la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique, et des procédures plus formalisées de labellisation, de suivi et de délabellisation.

Les Services d'Observation sont donc évalués régulièrement, et susceptibles d'être délabellisés lorsqu'ils ne sont plus pertinents, mais leur gestion dépasse le cadre des quadriennaux des laboratoires et des financements sur programme. Elle doit être du ressort des OSU et des tutelles pour l'attribution des postes et des moyens pluriannuels pour la maintenance et la jouvence.

## **4 – CONTEXTE NATIONAL ET INTERNATIONAL**

### **4.1 RELATIONS AVEC LES AUTRES DISCIPLINES**

Par la vaste gamme des objets et milieux célestes étudiés, l'astrophysique offre un champ d'investigation inégalé pour la connaissance des phénomènes fondamentaux, et la

mise en perspective des théories élaborées à partir du cadre plus restreint offert à l'expérimentation sur Terre. Les observations ouvrent l'accès à des conditions difficilement reproductibles en laboratoire (grandes distances, hautes pressions et densités ou au contraire vides extrêmes et basses températures, champ magnétique fort, faible accélération, etc.) et donc la possibilité d'étendre les tests des lois physiques connues dans de nouveaux régimes. Mais les interfaces de l'astrophysique ne se limitent pas à la physique fondamentale. Les questionnements et découvertes astrophysiques suscitent des développements novateurs, théoriques ou expérimentaux, dans de nombreuses branches de la physique, de la chimie, des mathématiques, du traitement du signal comme de l'ingénierie. En retour, la démarche d'exploration de l'univers se nourrit des avancées d'autres domaines scientifiques. La multiplicité des collaborations nouées autour de la question des origines, origine de l'univers, origines des planètes et du système solaire, origine de la vie, une des interrogations majeures de l'humanité, illustre parfaitement la fécondité des collaborations interdisciplinaires pour l'astrophysique.

L'astrophysique des hautes énergies, ainsi que les questionnements sur l'origine et la structure de l'Univers, intéressent une communauté où les chercheurs de l'IN2P3, de l'INSU et de physique théorique (INP) s'associent. Les recherches s'appuient sur les grands relevés, dans une vaste gamme de longueurs d'onde (domaine millimétrique et submillimétrique pour le CMB, domaine visible pour l'énergie noire, domaine des hautes et très hautes énergies, etc.). Les avancées remarquables dans la détection de photons gammas (télescopes HESS, Fermi et bientôt CTA) ouvrent un nouveau champ de l'astronomie. Les PIR «Astroparticules», puis «Particules et Univers», contribuent à l'animation et à la structuration de cette communauté en liaison étroite avec les Programmes et GdR INSU. Une commission interdisciplinaire existait lors des deux précédents mandats du comité national, mais n'a pas été renouvelée. Le besoin d'échanges entre communautés de physiciens des particules, théoriciens et astrophysiciens, est toujours

vivace et devrait permettre un meilleur partage des compétences autour des grands projets.

Le domaine de la gravitation et des systèmes de référence d'espace et de temps est un autre domaine d'interface avec la physique fondamentale. En effet, l'étude des systèmes de référence apporte des possibilités nouvelles pour tester la physique fondamentale et plus particulièrement la relativité générale, que ce soit le principe d'équivalence, l'invariance de Lorentz, ou l'existence de forces supplémentaires. Le domaine est donc fortement interdisciplinaire, tant par les méthodes mises en oeuvre, qui vont des horloges utilisant les dernières avancées de la physique quantique aux systèmes de positionnement ultra-précis et aux calculs de mécanique céleste les plus détaillés, que par le champ d'application des résultats. Il faut noter la participation récente de cette communauté aux programmes des agences spatiales, qui fait émerger, comme expliqué plus haut, le besoin d'une structuration à l'échelle nationale et européenne. L'INSU vient de mettre en place une action spécifique sur cette thématique, pilotée conjointement avec l'INP.

L'étude des milieux astrophysiques requiert une expertise interdisciplinaire à propos des processus physiques, chimiques et dynamiques impliquant les atomes et molécules, les grains de poussière, les particules énergétiques, les plasmas, le rayonnement et le champ magnétique. L'astrophysique est donc naturellement en interface avec diverses branches de la physique et de la chimie, physique des plasmas, physique atomique et moléculaire et réactivité notamment. Ces activités se regroupent sous le vocable «astrophysique de laboratoire» qui fait l'objet d'un chapitre séparé.

L'astrophysique est naturellement aussi en interface avec les autres disciplines de l'INSU : l'exploration toujours plus avancée du système solaire et la diversité étonnante des systèmes d'exoplanètes offrent un champ d'investigation toujours plus vaste à la planétologie, où les compétences des spécialistes de géophysique, géochimie, climatologie, océanographie, astrophysique peuvent s'épauler. L'exploration à peine entamée des caractéristiques des exo-

planètes a déjà fait entrevoir la très grande variété de leurs propriétés, qui pose des défis nouveaux pour leur modélisation. La météorologie de l'espace et la climatologie de l'espace sont deux thématiques en émergence, où peuvent se retrouver les spécialistes de physique solaire et de l'atmosphère terrestre. L'étude de l'évolution des atmosphères primitives, l'impact de l'activité des étoiles hôtes sur ces atmosphères, ainsi que l'établissement de critères de présence d'une éventuelle activité biologiques, sont autant de questions d'interface entre astrophysique, physique des atmosphères et éventuellement biologie. La Cosmochimie apporte un savoir faire incomparable pour l'étude des matériaux terrestres et extraterrestres, qui contraint fortement les modèles de formation et d'évolution du système solaire. Le programme national de planétologie (PNP) joue pleinement son rôle de structuration et d'animation scientifique de la planétologie. Le PIR «Origines des planètes et de la Vie», renouvelé sous l'intitulé «Environnements planétaires et Origines de la Vie» prend en compte plus spécifiquement les questions relatives à la caractérisation des exoplanètes et à la composition des atmosphères, en relation avec la question de l'origine de la Vie. Il comporte un important volet de chimie et de biologie dans la poursuite des activités du GDR Exobiologie.

Les méthodes et moyens d'observations utilisés en astrophysique ouvrent des champs de recherche féconds à d'autres disciplines. Le traitement de l'information est un des exemples les plus marquants. En effet, le développement de méthodes de traitement d'image robustes est devenu un impératif majeur pour les nouveaux projets (grands relevés du ciel, optique adaptative, astrophysique des très hautes énergies, interférométrie, etc.). Réciproquement, les recherches menées par les laboratoires d'astrophysique apportent aux STIC (INS2I, INSIS, INSMI) des problématiques et des contributions originales. On peut citer les questions de la déconvolution et la reconstruction d'images, de la séparation de sources, et de l'analyse de données hyperspectrales, sans oublier l'analyse temps-fréquence (notamment pour le CMB). Les compétences acquises dans le domaine de la gestion des bases de données

interrogeables à distance sont importantes, à la fois pour la mise en place des bases elles-mêmes, mais aussi dans le développement d'outils destinés à gérer une grande quantité de données. Ces compétences préfigurent aussi l'outil scientifique et l'enjeu technologique qu'est l'Observatoire Virtuel astronomique – un précurseur pour toutes les disciplines en terme de mise à disposition des données scientifiques.

L'astronomie s'est développée sur l'ensemble du spectre électromagnétique, et même au-delà en utilisant les nouveaux messages que sont les particules comme les neutrinos, et bientôt les ondes gravitationnelles. Pour atteindre les meilleures performances (sensibilité, résolution spatiale, spectrale, temporelle, champ de vue, etc.), la communauté est très investie dans de nombreuses activités d'instrumentation, la photonique étant un domaine d'excellence de la discipline. Des collaborations existent avec des laboratoires d'ingénierie mais ces activités pourraient être mieux mises en valeur. Les projets astrophysiques étant très exigeants au niveau des spécifications instrumentales (sensibilité, conditions extrêmes de fonctionnement, autonomie), ils permettent l'émergence de nouveaux concepts qui peuvent ensuite être repris dans d'autres contextes. Il faut noter que les pôles de compétitivité sont des acteurs importants pour la mise en réseau des laboratoires et industriels ainsi que pour le financement (par exemple OPTITEC en Provence).

Avec ses nombreuses thématiques aux interfaces d'autres disciplines, l'astrophysique est confrontée à la difficulté de l'évaluation des activités interdisciplinaires. Il faut veiller à valoriser le travail réalisé dans de telles collaborations, au niveau de l'évaluation des laboratoires, des équipes comme de celles des chercheurs. Il est également important que des experts de l'ensemble des disciplines soient présents dans les structures d'évaluation. Même si le débat sur la formation initiale n'est pas tranché, il est souhaitable, quand les conditions locales le permettent, d'encourager les écoles doctorales à financer des thèses sur des sujets interdisciplinaires. Le CNRS peut

faciliter cette politique en participant au financement des bourses de thèse sur des sujets fléchés. La question de la gestion des recrutements dans les très nombreux champs interdisciplinaires en interface avec l'astronomie n'est pas résolue.

## 4.2 ORGANISATION NATIONALE

Le contexte de l'organisation nationale de l'astronomie en France est en forte évolution, avec en particulier la réforme du CNRS et l'application de la loi LRU (Liberté et Responsabilité des Universités). La particularité des Sciences de l'Univers est le pavage par les Observatoires des Sciences de l'Univers, qui sont entre autres en charge de l'organisation des Services d'Observation, avec la mise à disposition des personnels du corps des astronomes. L'équilibrage des responsabilités entre CNRS, Universités et Grands Établissements, et la prise en compte du caractère national, international et long terme des activités, sont fondamentaux pour la discipline.

Dans ce contexte, le rôle des Unités Mixtes de Recherche (UMR) au cœur du dispositif de recherche doit être réaffirmé comme un élément essentiel des succès de la recherche nationale, permettant de combiner l'organisation nationale (CNRS) et régionale, avec des ambitions européennes et internationales partagées. L'importance d'une politique de laboratoire dans les UMR est rappelée et soutenue : elle permet d'afficher des axes de recherche sur le long terme, par rapport à une dérive vers un simple rôle d'hôtel à projets. La recherche dans une discipline à moyens lourds doit avoir une partie programmée et une partie *non programmée*, ce qui demande un niveau correct en soutien de base et en moyens communs.

Le rôle des grands organismes reste essentiel pour la communauté astronomique : le CNES, en particulier, est un acteur-clé pour le bon déroulement et le suivi des expériences spatiales proposées au niveau européen et mondial, grâce à la structuration des labora-

toires spatiaux. La gestion des grands instruments sol et spatiaux nécessite une structuration nationale des laboratoires et des projets, face au risque de parcellisation de politiques locales. L'INSU est le garant de l'établissement et de la mise en œuvre d'une stratégie nationale.

### 4.3 LE CONTEXTE EUROPÉEN

L'astronomie est une discipline très fortement structurée au niveau européen. Au-delà du rôle intégrateur joué par les grandes agences sol et espace (ESO-ESA), la prise en compte aujourd'hui par les laboratoires et les équipes de la dimension stratégique des différents programmes mis en place par l'Union Européenne est indéniable. Sur les cinq dernières années par exemple, on dénombre près de 150 actions différentes pour un budget de plus de 60 M€ et ayant entraîné une activité à hauteur de plus de 150 hommes.an. Au-delà des réseaux traditionnels on voit apparaître aujourd'hui à une place tout à fait importante les grands programmes de la Communauté Européenne.

Le CNRS a, comme on l'a souligné plus haut, la responsabilité de l'ERA-NET ASTRO-NET, qui a notamment permis de coordonner les politiques scientifiques des organismes européens en astronomie. L'établissement d'une première véritable prospective astrophysique européenne s'est ensuite prolongé par l'établissement d'une feuille de route pour la mise en chantier des grandes infrastructures de recherche au service de ces priorités.

Le CNRS doit continuer à soutenir cet engagement en œuvrant pour mieux décliner ces grands programmes en appels d'offre adaptés aux développements des laboratoires français et doit aussi accompagner concrètement les équipes dans les diverses étapes des projets européens, avec le souci en particulier de pérenniser les acquis, ce que ne permettent pas les financements européens.

### 4.4 RELATIONS AVEC LA SOCIÉTÉ

L'astronomie est un canal remarquable pour sensibiliser le public, et en particulier les jeunes de tous milieux, aux questions et à la démarche scientifiques. C'est aussi un portail pour attirer les jeunes générations vers les carrières scientifiques et technologiques, et une façon efficace de combattre la montée des fausses sciences et de la pensée irrationnelle. La communauté a toujours considéré la diffusion des connaissances et la formation des étudiants comme des tâches importantes, et un groupe de travail du colloque de prospective s'est penché sur leurs différents aspects : enseignement universitaire, enseignement dans le primaire et le secondaire, et diffusion des connaissances vers le grand public.

L'un des soucis majeurs est la perte globale, hors Île-de-France, du nombre d'allocations doctorales ministérielles pour les doctorants de la discipline, avec le passage au LMD et au système des grandes Écoles Doctorales généralistes. Pour ce qui concerne les filières de Licence et Master, la difficulté quelquefois rencontrée pour négocier la « bi-appartenance » entre la Physique et les Sciences de l'Univers est notée. Pour l'enseignement en primaire et secondaire, il serait souhaitable qu'un astronome participe aux comités d'élaboration des programmes, et il faudrait mieux structurer les actions de formation des enseignants. Pour ce qui concerne les actions vers le grand public, où la demande est très forte, il faut continuer à encourager la participation des collègues de tous les corps. L'Année Mondiale de l'Astronomie (AMA09) a été un temps fort, et il faut trouver les moyens de pérenniser les actions les plus réussies mises en place à cette occasion. La création d'un réseau des chargés de communication des établissements serait sans doute utile.

Un autre élément de l'impact sociétal de la discipline est la valorisation, qui a été l'objet d'un autre groupe de travail de l'exercice de prospective. L'impact économique de la discipline est difficile à analyser suivant les critères habituels de valorisation des activités de

recherche. Malgré un nombre réduit de brevets, licences d'exploitations et entreprises créées, l'étude menée montre que les investissements alloués au développement de l'astronomie en général, et de l'investissement associé aux instruments en particulier, ont des retombées conséquentes pour le secteur industriel. Les partenaires de la discipline considèrent que les réelles retombées dépassent ce qui est immédiatement mesurable par l'ouverture de marchés internationaux, et bien au-delà de l'astronomie.

l'exercice de prospective de l'INSU 2009, dont quelques-uns étaient pilotés par des membres de la Section, mais pas tous, et de loin, et à ceux produits par des groupes de travail thématiques pilotés par les responsables des Programmes Nationaux et du GdR PCHE. On retrouvera les textes complets et la liste des auteurs dans le document de prospective de l'INSU. Nous remercions les nombreux contributeurs qui ont permis de bâtir cette vision de la conjoncture dans le domaine «Système Solaire et Univers Lointain», et soulignons le très gros travail de collecte d'information, d'analyse et de synthèse qu'ils ont accompli.

## REMERCIEMENTS

Ce texte fait largement appel aux documents produits par les groupes de travail de

## ANNEXE

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space	BigBOSS	Big Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
ALMA	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array	BOSS	Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (projet du SDSS-III)
AMA09	Année Mondiale de l'Astronomie 2009	CCAT	Cornell Caltech Atacama Telescope
AMS-02	Alpha Magnetic Spectrometer – 02	CDPP	Centre de Données de la Physique des Plasmas
ANR	Agence Nationale de la Recherche	CDS	Centre de Données astronomiques de Strasbourg
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch	CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
ASOV	Action Spécifique Observatoires Virtuels France	CFHT	Canada-France-Hawaii Telescope
BAO	Baryon Acoustic Oscillations	CFHT-LS	Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey
BASS2000	Base de données Solaires Sol 2000	CHARA	Center for High Angular Resolution Astronomy
		CINES	Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur

CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens	GALEX	Galaxy Evolution Explorer
CNES	Centre National d'Études Spatiales	GAP	Gravity Advanced Package
CMB	Cosmic Microwave Background	GdR	Groupement de Recherche
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	GENCI	Grand Equipement National de Calcul Intensif
COROT	CONvection, ROTation et Transits planétaires	GFT	Ground Follow-up Telescope
COSMOS	Cosmological evolution Survey	GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
CTA	Cherenkov Telescope Array	GRAM	Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie
DEMETER	Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions	GRAVITY	General Relativity Analysis via VLT InTerferometry
DGA	Direction Générale de l'Armement	HESS	High Energy Spectroscopic System
E-ELT	European Extremely Large Telescope	HR	Hertzsprung-Russell
EJSM	Europa Jupiter System Mission	HSHS	Hubble Sphere Hydrogen Survey
ELT	Extremely Large Telescope	ICRF	International Celestial Reference Frame
EPOV	Environnements Planétaires et Origine de la Vie	IMAGES	Intermediate MAss Galaxy Evolution Sequence
ERA-NET	European Research Area – Network	IMF	Initial Mass Function
ESA	European Space Agency	IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
ESFRI	European Strategy Forum for Research Infrastructure	INC	Institut de Chimie
ESO	European Southern Observatory (The European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere)	INP	Institut de Physique
ESPaDOs	Echelle SpectroPolArimetric Device for the ObservatioN of Stars	INPOP	Intégrateur Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris
EST	European Solar Telescope	INS2I	Institut des Sciences Informatiques et de leurs Interactions
EUCLID	ESA Dark Energy mission	INSMI	Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions
EUV	Extreme UV	INSIS	Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
FASR	Frequency Agile Solar Radiotelescope	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers

INTEGRAL	International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory	MIS	Milieu Interstellaire
IOTA	Infrared Optical Telescope Array	MMS	Magnetospheric MultiScale
IRAM	Institut de Radioastronomie Millimétrique	NACO	NAOS (Nasmyth Adaptive Optics System) – CONICA (Near Infrared Imager and Spectrograph)
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor	NASA	National Aeronautics and Space Administration
IVOA	International Virtual Observatory Alliance	NOEMA	NORthern Extended Millimeter Array
IXO	International X-ray Observatory	ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales
JETSET	Jets Simulations, Experiments and Theory	OPTITEC	Pôle de compétitivité Optique et Photonique
JMMC	Jean-Marie Mariotti Centre	OPV	Origine des Planètes et de la Vie
JWST	James Webb Space Telescope	OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
LHC	Large Hadron Collider	OV	Observatoire Virtuel
LISA	Laser Interferometer Space Antenna	PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
LMD	Licence – Master – Doctorat	PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
LNE	Laboratoire National de métrologie et d'Essais	PCHE	Phénomènes Cosmiques de Haute Energie (GdR)
LOFAR	Low Frequency Array	PCMI	Physique Chimie du Milieu Interstellaire (PN)
LORENE	Langage Objet pour la RELativité Numérique	PHARAO	Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite
LRU	Libertés et Responsabilités des Universités	PI	Principal Investigator
LSST	Large Synoptic Survey Telescope	PIR	Programme Interdisciplinaire de Recherche
MAMBO	Max-Planck Millimetre Bolometer	PIRENEA	Piège à Ions pour la Recherche et l'Etude de Nouvelles Espèces Astrochimiques
MASSIV	Mass Assembly Survey with SINFONI in VVDS	PLATO	PLANetary Transit and Oscillations of stars
MATISSE	Multi-AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment	PN	Programme National
MEDOC	Multi Experiment Data and Operation Centre	PNC	Programme National Cosmologie
MHD	MagnétoHydroDynamique	PNCG	Programme National Cosmologie et Galaxies
MICROSCOPE	MICRO-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence		

PNG	Programme National Galaxies	TAROT	Télescope A Action Rapide pour les Objets Transitoires
PNP	Programme National Planétologie	TBL	Télescope Bernard Lyot
PNPS	Programme National de Physique Stellaire	TCFH	Télescope Canada France Hawaii
PNST	Programme National Soleil-Terre	Terapix	Traitement Elémentaire, Réduction et Analyse des Pixels de MegaCam
PRACE	Partnership for Advanced Computing in Europe	TGE	Très Grand Equipement
R&D	Recherche et Développement	THEMIS	Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires (sol)
RHESSI	Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager	THEMIS	Time History of Events and Macro-scale Interactions during Substorms (satellites)
SAURON	Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae	TRACE	Transition Region and Coronal Explorer
SDO	Solar Dynamics Explorer	UA	Unité Astronomique
SDSS	Sloan Digital Sky Survey	UMR	Unité Mixte de Recherche
SKA	Square Kilometer Array	UV	UltraViolet
SNIa	SuperNovae de type Ia	VAMDC	Virtual Atomic and Molecular Data Centre
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory	VLBI	Very Long Base Interferometry
SPECMO	SPECtroscope MOleculaire	VLT(I)	Very Large Telescope (Interferometer)
SPICA	Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics	VSI	VLTI Spectro-Imager
SPIROU	SpectroPolarimètre InfraROUge	VVDS	VIMOS Very Deep Survey
STEREO	Solar TERrestrial RELations Observatory	XMM	X-Ray Multi-Mirror
SUPER-DARN	Super Dual Auroral Radar Network	WIRCAM	Wide-field InfraRed CAMera
SVOM	Space-based multiband Variable Object Monitor	WL	Weak Lensing
T2L2	Transfert de Temps par Lien Laser		
TARANIS	Tool for the Analysis of Radiation from lightNING and Sprites		

# TERRE ET PLANÈTES TELLURIQUES : STRUCTURE, HISTOIRE, MODÈLES

*Président par intérim*

Philippe CHARVIS

*Président*

Yves LAGABRIELLE

Olivier ALLARD

José ATIENZA

Olivier BEYSSAC

Nathalie BOLFAN-CASANOVA

Frédéric CHRISTOPHOUL

Gilles DROUET-MALEWITCH

Dominique GIBERT

Damien GUILLAUME

Stéphane GUILLOT

Jannick INGRIN

Olivier LACOMBE

Bernard MARTY

Anders MEIBOM

Anne PAUL

Yanick RICARD

Delphine ROUBY

Patrick SCHIBLER

Thomas SERVAIS

Sylvie VERGNOLLE

## PRÉAMBULE

Les thématiques de la section 18 à l'interface avec d'autres sections restent celles qui avaient été identifiées dans le rapport de conjoncture en 2006. Ces thématiques sont la formation du système solaire et la planétologie à l'interface avec la section 17 « Système solaire et univers lointain », l'étude des paléo-environnements à l'interface avec la section 19 « Système terre enveloppes superficielles », des processus sédimentaires, d'érosion et d'évolution des reliefs à l'interface avec la section 20 « Surface continentale et interfaces », et d'une partie de la paléontologie à l'interface avec la section 29 « Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des macromolécules aux communautés ». C'est principalement dans ce dernier cas que de nombreux jeunes chercheurs sont candidats aux concours de chargés de recherche en section 29 et 18.

La section 18 comprend 321 chercheurs dont la moyenne d'âge est de 46 ans (197 chargés de recherche et 124 directeurs de recherche). La répartition des genres est la suivante : 27% femmes, avec une moyenne d'âge de 43,5 ans. Mais la répartition entre les corps est inégale avec 33% de femmes dans le corps des CR et seulement 19% dans le corps des DR.

La répartition géographique des chercheurs de la section 18 est de 31,5% en IDF,

35,8% dans le Sud-est, 11,8% dans le Nord-est, 11,5% dans le Nord-ouest, 8,7% dans le Sud-ouest et enfin 0,6% dans les DOM-TOM et à l'Étranger.

29 laboratoires sont rattachés à la section 18 dont 23 en rattachement principal.

**Tableau 1. Effectif des laboratoires rattachés à la section 18 (\* laboratoires en rattachement secondaire)**

Laboratoires	Effectif CNRS	Effectif total
IPG Paris	44	138
LMTG Toulouse	23	90
LSCE Gif*	29	88
CEREGE Aix*	32	76
Geosc. Montpellier	35	68
LMV Clermont	15	63
Géoazur Nice	16	60
LGIT Grenoble	21	59
Géosciences Rennes	25	57
ISTO Orléans	13	55
IPG Strasbourg	15	55
ISTEP Paris	9	53
MNHN CR2P*	12	47
Géosystèmes Lille	6	45
Biogéosciences Dijon*	8	37
PEPS Lyon	10	36
IDES Orsay	5	36
Dom. Océan. Brest	14	36
UMET Lille*	10	33
LPGN Nantes	5	33
LGCA Grenoble	8	31
M2C Caen*	2	31
ENS Lyon	11	29
CRPG Nancy	12	27
G2R Nancy	7	27

Laboratoires	Effectif CNRS	Effectif total
DTP Toulouse	14	24
ENS Paris	16	20
MNHN LMCM	4	14
IMPMC Paris*	7	29
<b>Total</b>	<b>421</b>	<b>1 368</b>

Ce rapport de conjoncture se place dans la continuité des réflexions sur les grands enjeux scientifiques, instrumentaux, sociétaux et industriels des Sciences de la Terre (ST) qui ont été menées au cours du colloque de prospective de l'INSU en Sciences de la Terre (Aussois 2008). Ainsi, son organisation s'inscrit dans la logique définie au cours de ce colloque, c'est-à-dire autour de 5 axes scientifiques, structurés en comités thématiques chargés d'assurer en continu (i) la réflexion scientifique prospective du thème, (ii) la définition des actions incitatives et (iii) les relations inter organismes (publiques ou privés) nécessaires au développement du thème. Nous remercions les différents comités thématiques qui ont tous apportés leur contribution à ce rapport de conjoncture.

Les thèmes sont : (1) la formation et fonctionnement des planètes ; (2) Terre interne et Terre externe, processus et couplages ; (3) les risques et catastrophe telluriques ; (4) la Terre vivante ; (5) les ressources géologiques et le développement durable.

## 1 – FORMATION ET FONCTIONNEMENT DES PLANÈTES

La communauté Sciences de la Terre participe largement à la recherche concernant la formation et l'évolution du système solaire et des planètes, selon les disciplines suivantes : (i) la cosmochimie, approche typiquement ST

(géochimie élémentaire et isotopique), (ii) la minéralogie et pétrologie des objets extraterrestres (micrométéorites, météorites, comètes, échantillons ramenés par des missions spatiales, expériences en laboratoire visant à reconstituer les conditions de formation du système solaire, la haute température et la basse pression, ou dans l'établissement des caractéristiques physico-chimiques des glaces), (iii) la géophysique et la géochimie internes, qui reconstituent la formation des corps planétaires et leur évolution précoce, et (iv) l'étude de la Terre primitive, c'est-à-dire de notre planète durant le premier milliard d'années, faisant appel à des approches multidisciplinaires comme la géologie de terrain, la pétrologie et la géochimie des roches très anciennes, et la nanoanalyse des premières traces de vie. D'autre part, la communauté ST est largement présente dans l'exploration du système solaire, et participe pleinement à la caractérisation et à l'analyse des échantillons ramenés de l'espace par des missions spatiales : Apollo et Luna (Lune), Stardust (grains cométaires) ou Genesis (matière solaire), et est partie prenante dans plusieurs projets spatiaux (exploration d'astéroïdes, des satellites de Jupiter et de Saturne) et dans des missions phares (par exemple Chemcam sur Mars Surface Laboratory).

Ce thème regroupe environ 173 chercheurs répartis dans une vingtaine de laboratoires.

## 1.1 FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE

Le contexte astrophysique de la formation du système solaire est depuis quelques années bien alimenté par les observations des disques circumstellaires des étoiles en formation. L'identification des différentes étapes de l'évolution minéralogique dans le disque protoplanétaire est une des clés de la compréhension de la formation de notre système solaire. Dans ce contexte, l'étude des météorites primitives, des micrométéorites ou des poussières cométaires et leur confrontation avec les observations des astrophysiciens représentent un enjeu majeur.

D'une part, la communauté française joue un rôle très actif dans l'interprétation des chronomètres radioactifs à courte période ( $^{10}\text{Be}$  et  $^7\text{Be}$  et d'autres à développer  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{14}\text{C}$ , etc.) pour l'établissement d'une échelle chronologique de la formation du système solaire.

D'autre part, la distribution des isotopes stables des éléments légers (e.g. H, C, N, O) et la mesure des « anomalies » isotopiques (variations indépendantes de la masse ; Os, O, Cu, Zn, Fe, etc.) ont une implication cruciale pour les origines des atmosphères planétaires. L'effort particulier développé depuis quelques années pour étudier et quantifier la nanostructure des phases carbonées (matière organique, nano-diamants, graphites...) doit être aussi consolidé.

## 1.2 ÉVOLUTION PLANÉTAIRE PRÉCOCE : DES PLANÉTÉSIMAUX À LA TERRE PRIMITIVE

L'étude pétrologique et géochimique des météorites permet aussi de remonter aux processus de différenciation, métamorphisme et altération ayant affecté les planétésimaux. À une échelle encore plus grande, les météorites martiennes (SNC) nous renseignent sur l'évolution magmatique apparemment très complexe d'une planète plus petite que la Terre. Ces SNC continueront de jouer un grand rôle dans la définition des missions géochimiques martiennes. Enfin, l'expertise minéralogique de la communauté ST est prépondérante dans la reconnaissance par orbiteur de la composition de Mars (Mars Express) et de la présence passée d'eau.

## 1.3 TERRE PRIMITIVE

Tout pose problème quand il s'agit de décrire l'évolution de la Terre au cours de la première centaine de millions d'années de son

existence. La formation d'un océan magmatique, la différenciation du manteau, la formation du noyau, l'apparition de la croûte océanique et des premières croûtes continentales... autant de mécanismes où les conditions initiales semblent avoir joué un rôle central. Quelles sont les contributions relatives de ces conditions sur la structure actuelle de la Terre profonde : sa taille qui dicte sa gravité, sa vitesse d'accrétion, sa teneur en radio-isotopes disparus qui dictent le gradient de température et la convection durant les premières centaines de millions d'années, sa composition chimique qui dicte la taille de son noyau et donc l'évolution de son champ magnétique ?

Il existe plusieurs façons d'aborder ces questions. (1) Par l'analyse pétrologique, minéralogique et géochimique des roches sédimentaires et cristallines les plus vieilles et les mieux conservées sur la Terre, au-delà de 3 milliards d'années. Cela permettra de répondre à la question de l'origine et la nature de la première croûte, par exemple, via les mesures hyper précises des systèmes isotopiques de l'Hf et du Nd. (2) Par les modèles théoriques qui décrivent le bombardement extraterrestre, la ségrégation du noyau, la convection mantellique, les processus de production et d'évacuation de la chaleur interne, l'existence et l'épaisseur de l'océan magmatique, l'évolution du degré d'oxydation du manteau au cours des âges géologiques, la composition chondritique de la Terre à une échelle globale, le calendrier de la mise en place des grandes structures du manteau. (3) Par des expériences de laboratoire qui reconstituent des conditions de haute pression et de haute température pour étudier les changements de phase en profondeur, les solubilités des éléments volatils enfouis dans le manteau via la tectonique des plaques, la réduction des silicates à l'origine de l'extraction du métal constituant aujourd'hui le noyau.

## 1.4 TERRE INTERNE

Un des enjeux majeurs de l'étude de la Dynamique Interne de la Terre est d'observer

et expliquer la structure thermique et chimique du manteau en tenant compte de l'évolution de la planète depuis la formation du noyau. Pour cela, il faut faire converger différentes disciplines comme la géochimie, identifiant des réservoirs cachés et leur caractéristiques chimiques et isotopiques, la pétrologie expérimentale qui apporte les données sur les coefficients de partage, les processus et les conditions de la différenciation terrestre, la minéralogie physique fournissant des contraintes sur les propriétés physiques de densité et de structure des minéraux (données importantes pour contraindre le géotherme), la sismologie apportant les observations sur l'état de fusion ou non et les anomalies de vitesses, la modélisation analogique, et enfin la modélisation numérique qui permet de relier toutes les contraintes afin d'aboutir à un modèle global. Dans le domaine de la jeune Terre interne, les efforts de modélisation ont porté sur les mécanismes de la ségrégation du métal, la convection à haut nombre de Rayleigh, la dynamique des Océans magmatique, l'état thermique et la différenciation des planétésimaux.

## 1.5 DYNAMIQUE DU MANTEAU

Concernant la dynamique du manteau, un point crucial est de comprendre la fusion partielle du manteau et le filtre qu'elle exerce sur les données géochimiques et sismologiques. Pour cela les expériences de pétrologie expérimentale ainsi que l'étude des inclusions vitreuses de magmas primaires apportent des informations clés. Il faut néanmoins aussi mieux appréhender les processus de transport et de focalisation par l'expérience et la modélisation. Dans cette optique, l'expertise dans la lecture des roches naturelles du manteau reste un atout précieux en France.

Le rôle joué par les fluides dans le système C-O-H est aussi important dans la dynamique d'une planète, et d'actualité : quel est le bilan de leur recyclage au niveau des zones de subduction, par quels mécanismes se déplacent-ils dans le manteau et quels sont leurs

effets sur les propriétés du manteau comme sa métasomatisme, sa viscosité, son anisotropie et atténuation mais aussi sa conductivité électrique? Encore un domaine où la géophysique, la géochimie et la pétrologie expérimentale se rejoignent avec la modélisation.

Dans le manteau plus profond, le rôle joué par la découverte de récentes transitions comme la transition de spin et l'existence de la post-pérovskite indiquent de nouvelles voies pour comprendre la structure du manteau profond au niveau de la limite noyau-manteau coïncidant avec la couche D'', caractérisée par de fortes hétérogénéités de vitesse avec des zones partiellement fondues et une forte anisotropie. Mieux imager cette zone permettra d'améliorer nos interprétations sur la structure chimique, sismique et thermique de la base du manteau. Les structures observées sont-elles héritées de la cristallisation de l'océan magmatique? Ou bien résultent-elles de la subduction plus tardive? De la fusion? Ou simplement d'un changement de phase? La question reste ouverte.

## 1.6 NOYAU

Comprendre la turbulence de la géodynamo implique l'étude des liens avec les phénomènes comme la variation séculaire du champ magnétique, les secousses magnétiques et les inversions, le bilan énergétique et l'évolution de la géodynamo aux échelles de temps géologiques. On note que l'observation du champ magnétique terrestre depuis l'espace sera possible avec la mission SWARM au début de la prochaine décennie.

La structure de la graine et son processus de cristallisation devront aussi être plus amplement abordés. Pour cela il faudra étendre notre connaissance des diagrammes de fusion du fer avec éléments légers aux conditions du noyau. La question de la composition du noyau reste ouverte notamment la nature des éléments légers. Des éléments de réponse peuvent aussi venir de l'étude de la structure et l'équa-

tion d'état des alliages de fer sous conditions extrêmes. L'étude de l'équation d'état du fer solide et de l'anisotropie de la graine apportera des contraintes sur la composition et la température du noyau. Il est clair que dans ce domaine la modélisation *ab initio* revêt un intérêt tout particulier.

## 1.7 DÉVELOPPEMENTS TECHNIQUES ET ÉQUIPEMENTS

Imager quantitativement la Terre interne nécessite le développement de nouvelles techniques de sismologie (ex : tomographie à partir du bruit, tomographie de l'atténuation sismique, modélisation des amplitudes des ondes...), le développement de réseaux d'observation pérennes (ex : stations fonds de mer, réseaux denses à terre, observations spatiales).

Dans le domaine de la pétrologie expérimentale l'avènement de presses gros volumes sur les anneaux synchrotron de dernière génération va permettre d'étudier *in situ* les propriétés physiques et chimiques des matériaux terrestres à haute pression et haute température. Il sera particulièrement important d'augmenter la ressource en ingénieurs de recherche voués à ces expériences synchrotron.

## 2 – TERRE INTERNE ET TERRE EXTERNE, PROCESSUS ET COUPLAGES

Un défi majeur des Sciences de la Terre est la description du fonctionnement et de l'évolution temporelle de la surface de la Terre comme la résultante de nombreux processus mettant en relation la Terre interne avec les enveloppes superficielles : lithosphère, biosphère, hydrosphère, atmosphère. Ces processus sont à l'œuvre à travers une large gamme

de fréquences temporelles, depuis le milliard d'années jusqu'à l'échelle séculaire.

## **2.1 PROCESSUS COUPLANT LES ENVELOPPES SUPERFICIELLES AVEC LA TERRE INTERNE**

Il s'agit de l'étude de la machine tectonique, de la mesure et de la compréhension des causes et des conséquences des mouvements, à la fois horizontaux (mouvement des plaques) et verticaux (surrection des chaînes de montagnes, activité des zones de subduction). Les principales questions scientifiques sont :

– Quelle est l'origine des forces qui contrôlent les déformations et quelle est la rhéologie de la croûte et de la lithosphère? Quel est le rôle de la convection mantellique sur le niveau des océans, sur les reliefs, les processus d'érosion, etc. Quelle est la dynamique des processus aux frontières de plaques en domaine océanique (dorsales, failles sous-marines, subduction), et quelles en sont les conséquences? Quelle est l'évolution pétrographique et thermique du manteau et de la lithosphère? Peut-on imager la limite lithosphère-asthénosphère?

– Quels sont les flux du recyclage « surface-Terre interne » au travers des fluides et des gaz? Comment s'effectue le transfert des fluides au niveau des zones de subduction et comment naît la diversité des laves d'arc? Pour cela l'étude des inclusions vitreuses mais aussi l'expérimentation associées à la modélisation numérique peuvent apporter des réponses clés et fournir des modèles de formation du volcanisme de subduction.

– Quelle est la dynamique des processus érosifs (continentaux et côtiers), quels sont les flux de matière en jeu et quel est leur impact sur les cycles biogéochimiques à toutes les échelles de temps et d'espace? Comment fonctionnent les processus de couplages entre tectonique, relief, climat, érosion, altération chimique? Quels contrôles le relief exerce-t-il sur le bilan de matières (solides et dissoutes) transférées

des continents aux océans? Quelles sont les causes de la variabilité de ces flux?

La compréhension de ces processus et de leur évolution temporelle (âges, vitesses, constantes de temps des différents processus) nécessite l'acquisition de données à différentes échelles de temps et d'espace (tectonique, sédimentologie-stratigraphie, pétro-géochimie, imagerie géophysique, y compris dans la partie profonde de la croûte et de la lithosphère, géomorphologie à haute résolution; géochronologie à haute résolution).

De même, les efforts de modélisation numérique et analogique de ces systèmes sont nécessaires et doivent être soutenus tout en restant en phase avec l'observation du milieu naturel.

## **2.2 ÉVOLUTION BIOGÉOCHIMIQUE ET CLIMATIQUE DE LA SURFACE DE LA TERRE : LES COUPLAGES TERRE SOLIDE – CLIMAT – CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET ÉVOLUTION DE LA VIE**

Les changements à basse et haute fréquence du climat et de l'environnement global ne peuvent se comprendre que via l'étude des nombreux processus agissant entre les diverses sphères internes et externes du système Terre, et constituent un continuum depuis le milliard d'années jusqu'aux échelles millénaires et séculaires. Les points suivants doivent être particulièrement soutenus :

– Compréhension de l'enregistrement et des causes de l'évolution à long terme de l'environnement de la surface terrestre (continent, océan, atmosphère, climat), du rôle des évolutions biologiques majeures dans cette évolution globale, du rôle des contraintes et des couplages géodynamiques (création et destruction de reliefs, déplacements des plaques, ouverture et fermeture de passages océaniques...) sur l'évolution géochimique, biologique et climatique de la Terre.

– Sont concernés également l'enregistrement et l'étude des causes et conséquences des modifications brutales de l'environnement terrestre : les périodes de crises biologiques, d'accidents géochimiques et climatiques de l'Archéen au Quaternaire. Préciser et quantifier les flux de matière est essentiel pour les modèles de forçage globaux.

## 2.3 MESURE PRÉCISE DU TEMPS GÉOLOGIQUE : CONTRAINDRE LES ÂGES ET LA DYNAMIQUE DES PROCESSUS

La mesure du temps est sous jacente à de multiples thèmes développés ici, en particulier ceux ci-après. Les techniques de datations « classiques » doivent être soutenues et devenir accessibles au travers de réseaux nationaux. En parallèle, un effort particulier devra soutenir le développement de techniques plus récentes ou en devenir, telles la thermochronologie haute résolution et les méthodes OSL et  $^3\text{He}/^4\text{He}$  qui sont en plein développement actuellement. Ceci doit se faire au travers de laboratoires regroupant spécialistes physiciens et chimistes des processus mis en jeu, et géologues utilisateurs.

Laboratoire	Chercheurs et enseignants-chercheurs
<i>Géosciences Rennes</i>	~ 50
<i>LMTG Toulouse</i>	~ 50
<i>ISTEP Paris</i>	~ 40
<i>IGCA Grenoble</i>	~ 30
<i>LGIT Grenoble</i>	~ 30
<i>Géoazur Nice</i>	~ 30
<i>CRPG Nancy</i>	~ 25
<i>Domaines Océaniques Brest</i>	~ 25
<i>ISTO Orléans</i>	~ 20
<i>ENS Lyon</i>	~ 20
<i>CEREGE Aix-Marseille</i>	~ 20
<i>ENS Paris</i>	~ 15
<i>LPGN Nantes</i>	~ 15
<i>DTP Toulouse</i>	~ 10
<i>IDES Orsay</i>	~ 10
<i>G2R Nancy</i>	~ 10
<i>IMPMC Paris</i>	~ 6
<i>EPOC Talence</i>	~ 5
<b>Total</b>	~ 680

## 2.4 COMMUNAUTÉ IMPLIQUÉE

Tableau 2. Laboratoires et nombre indicatif de chercheurs et enseignants-chercheurs potentiellement impliqués dans le thème

Laboratoire	Chercheurs et enseignants-chercheurs
<i>IPG Paris</i>	~ 100
<i>LMV Clermont</i>	~ 60
<i>IPG Strasbourg</i>	~ 55
<i>Géosciences Montpellier</i>	~ 50

## 3 – ALÉAS, RISQUES ET CATASTROPHES TELLURIQUES

Ce chapitre est principalement basé sur le compte-rendu de la journée de prospective organisée par le comité thématique 3 « Aléas, Risques et Catastrophes Telluriques » de l'INSU (Novembre 2009). Il faut noter que cette thématique a fait l'objet depuis 2005 de deux programmes spécifiques de l'ANR, d'abord le programme CATELL (2005-2007), puis le pro-

gramme RISKNAT (2008-2009). Depuis 2010, il n'y a plus de programme spécifique pour l'étude des aléas et risques naturels même si cette année, à la suite du séisme dramatique d'Haïti, un appel d'offre d'un nouveau type dit « flash », a été mis en place par l'ANR pour permettre de répondre dans l'urgence aux questions scientifiques que posent cette catastrophe mondiale.

La thématique Aléas et Risques naturels ayant un très fort impact sociétal, il est important que les travaux menés dans le cadre de cette thématique suivent ou contribuent à développer une approche transverse, impliquant non seulement la communauté des sciences de la terre (étude des processus et quantification de l'aléa), mais aussi les sciences de l'ingénieur et la mécanique (vulnérabilité des bâtiments), et certains secteurs des sciences humaines et sociales (vulnérabilité des populations). Dans les domaines qui se rapprochent de la quantification du risque, il est nécessaire de tisser des liens avec les organismes en charge de ces sujets (BRGM, IRSN, CETE, AFPS...).

Des informations scientifiques importantes peuvent être acquises immédiatement après certains grands séismes. Pour permettre ces acquisitions, l'INSU s'est doté d'une cellule d'intervention post-sismique qui organise, le cas échéant, l'intervention des équipes et des équipements français sur le terrain. Cette cellule a particulièrement bien fonctionné lors des crises sismiques de L'Aquila en avril 2009, puis d'Haïti et du Chili au début de l'année 2010.

### 3.1 SÉISMES

Les objectifs principaux sont la caractérisation précise et la modélisation du fonctionnement des failles sismogènes au cours des différentes phases du cycle sismique, le développement de modèles de source plus réalistes et la quantification de leurs incertitudes, la recherche et la compréhension physique des propriétés génériques des failles

et des séismes, mais aussi la modélisation plus robuste des mouvements du sol et de la vulnérabilité physique des structures.

Sur le plan observationnel, ceci nécessite l'augmentation de la densité, de la précision et de la continuité de l'acquisition des données, notamment en développant :

- des mesures haute résolution et continues des déformations au cours du cycle sismique avec des réseaux régionaux multiparamètres (sismomètres, GPS, inclinomètres) permanents sur certains chantiers ciblés ;

- des analyses InSAR et GPS pour l'étude des déformations de faible amplitude et large échelle spatiale, et le suivi des déformations lentes ;

- les méthodes d'analyse du GPS haute fréquence et des données sismologiques issues de capteurs en forage afin d'appréhender l'ensemble du spectre des déformations ;

- des méthodes de corrélation d'images satellitaires optiques et radar afin de valoriser les données des futurs satellites d'observation et d'en extraire des mesures de déformation du sol complémentaires aux mesures géodésiques ;

- des réseaux plus denses d'enregistrement sismologique en mer, où les données disponibles sont encore trop rares.

Certains aspects analytiques devront par ailleurs être renforcés, comme :

- le développement de nouvelles méthodes paléosismologiques permettant l'identification et la caractérisation des forts séismes passés ;

- la datation des objets et processus géologiques récents ;

- les études en laboratoire des processus de fluage et de cicatrisation des failles.

Enfin, le développement de nouveaux modèles physiques est nécessaire, notamment :

- de nouveaux modèles physiques de failles et de ruptures prenant en compte les variations non linéaires des propriétés des failles et du milieu, des géométries de faille réalistes, l'existence de certaines propriétés génériques, etc. ;

- des modèles d'inversion sismologiques plus réalistes prenant en compte les propriétés de la faille rompue et du milieu, associés à la quantification de leurs incertitudes ;

- des modèles de transferts de contraintes (statiques, dynamiques, hydromécaniques etc.) prenant également en compte les propriétés complexes et non linéaires des failles et du milieu ;

- des modèles permettant de restituer les hautes fréquences des mouvements du sol.

- des modèles d'estimation des aléas et des risques prenant en compte l'ensemble du spectre d'information sur les sources de ces aléas et risques, ainsi que les incertitudes épistémiques, liées à notre manque de connaissance.

## 3.2 VOLCANISME

Les questions clefs qui se posent à la communauté volcanologique sont :

- la compréhension du fonctionnement physique des systèmes volcaniques et le rôle des fluides volcaniques ;

- le déchiffrement et l'interprétation des pré-curseurs volcaniques, notamment au travers d'études multiparamètres alliant géophysique, géochimie, pétrologie et modélisation ;

- le développement des liens quantitatifs entre processus et produits éruptifs, par la mise en œuvre d'études couplant les aspects du terrain aux modélisations théoriques, en passant par des mesures fines et des expérimentations en laboratoire. Les réponses à ces questionnements passent par la mise en œuvre de nouveaux outils tels que, entre autres, la télédétection satellitaire ou *in situ*. L'actualité en Islande, par exemple, a démontré l'intérêt de la surveillance spatiale non seulement pour la caractérisation de la dynamique des éruptions mais aussi pour la quantification des bilans de masse des matériaux injectés dans l'atmosphère, avec une forte implication pour le climat.

En pratique, il est nécessaire d'identifier des cibles thématiques et/ou géographiques fédératives, s'appuyant en priorité sur les volcans dont l'activité est surveillée par la France.

## 3.3 LES MOUVEMENTS DE TERRAINS

La compréhension des processus physiques et la modélisation des instabilités gravitaires, de l'initiation de la rupture à la déstabilisation, en milieu aérien ou sous-marin, nécessitent la prise en compte :

- de la complexité naturelle des systèmes gravitaires, entre autres à travers la quantification et la modélisation de l'effet des sollicitations sismiques, volcaniques, climatiques ou anthropiques ;

- de la topographie locale, de la fracturation du milieu, du rôle des fluides (eau, gaz...), des processus d'érosion et dépôt, des effets thermiques et de l'hétérogénéité des matériaux mis en jeu.

Pour cela il est nécessaire :

- d'acquérir des données multi-paramètres, notamment sur la caractérisation 3D du milieu et la dynamique des différents types d'instabilités à différentes échelles d'espace et de temps ;

- de développer des outils et modèles pour interpréter les données ;

- de déterminer les lois rhéologiques adaptées aux différents types d'instabilités, tant dans la phase d'endommagement que dans les phases de rupture et d'écoulement.

Enfin, un axe de recherche majeur porte sur le développement d'outils d'estimation des aléas liés aux instabilités gravitaires aux différentes échelles (locale, communale, régionale) basés sur les connaissances de pointe dans le domaine ainsi que sur l'estimation des incertitudes inhérentes aux modèles utilisés.

### **3.4 INTERACTIONS ENTRE ALÉAS SISMIQUES, VOLCANIQUES ET GRAVITAIRES**

Il existe de nombreuses interactions possibles entre crises sismiques, éruptions volcaniques, déclenchements d'instabilités gravitaires, tsunamis, etc. L'exemple le plus courant est, dans le cas d'un séisme majeur, la déstabilisation du matériel sédimentaire sur pentes sous-marines qui peut lors de son effondrement engendrer un tsunami. Il est donc important, d'une part d'avoir des systèmes d'observation multiparamètres adaptés des systèmes actifs (failles, volcans, instabilités gravitaires), et d'autre part de développer la modélisation de l'initiation des processus (principalement les glissements de terrain sous l'effet des accélérations sismiques et ou de l'augmentation de pression de fluides).

### **3.5 DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX ET MÉTHODOLOGIQUES**

Pour atteindre les objectifs scientifiques listés ci-dessus, un certain nombre de moyens instrumentaux, techniques et logistiques devront être développés dans la communauté nationale, éventuellement en lien avec d'autres établissements :

- Parc national de télédétection par laser Lidar, à terre et aéroporté (en relation avec l'IGN) ;

- Développement d'une imagerie spatiale dédiée à nos problématiques (c'est-à-dire avec un temps de retour court entre les prises de vue) (en relation avec le CNES) ;

- Développement de logiciels de traitement des données GPS plus performants (CNES) ;

- Sondeurs multifaisceaux portables pour cartographier les petits fonds sous-marins (instabilités gravitaires, failles actives) ;

- Nappes denses de capteurs sismologiques, GPS mobiles terre et mer (TGIR RESIF), notamment en champ très proche.

- Outils d'investigation géophysique de sub-surface (électrique, GPR, EM, PS, MT, etc.).

- Développement d'un laboratoire de datation par luminescence optique (OSL) ;

Dans certains cas, les systèmes d'acquisition ou les bases de données sont disponibles dans d'autres établissements, mais leur accès devrait être facilité dans le cadre de conventions spécifiques :

- MNT haute résolution de l'IGN ;

- moyens océanographiques ;

- données bathymétriques du SHOM.

Il est capital d'avoir les moyens humains pour la maintenance des instruments existants et souhaités, pour leur déploiement, et pour la mise en forme des données obtenues avec ces instruments, en dialogue permanent avec les chercheurs. Cet effort pourrait être réalisé au travers de certains laboratoires ou de services nationaux.

La construction de bases de données homogènes et ouvertes au niveau national doit être envisagée pour toutes les données acquises avec les moyens nationaux. Ces bases existent et sont en évolution permanentes (pour les rendre plus efficaces et permettre de stocker l'ensemble des données) pour les données sismologiques et géodésiques (TGIR). Elles sont en revanche totalement à développer pour les images satellitaires et aériennes existantes ; mais aussi plus généralement pour toutes les données d'images acquises dans la communauté, en particulier sismiques, géophysiques de subsurface, géologiques, etc.

La compréhension des processus implique clairement le développement de quelques « laboratoires naturels » instrumentés en continu sur des temps longs (au moins 10 ans), en complément des cibles temporaires, permettant l'acquisition de données denses, permanentes, longues, multidiscipli-

naires et mutualisées. Un premier pas a été fait avec la création d'un label « Site instrumenté » par l'INSU ; toutefois, pour l'instant, les moyens financiers indispensables sont inexistant. Il est aussi important de développer l'observation pérenne en mer, où elle est quasiment inexistante, en particulier dans le cadre des projets européens comme EMSO.

La mise en place du nouvel Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV) dédié à l'étude des glissements gravitaires « lents » est une avancée importante qui doit être le point de départ d'une mise en place plus large de systèmes d'observation et de surveillance des instabilités gravitaires.

Enfin il existe un déficit assez important de recrutement de chercheurs dans certains domaines où la communauté actuelle est réduite, soit parce que cette communauté est nouvelle et en voie de développement, soit parce qu'elle s'est fortement réduite dans les dernières décennies. Parmi ces domaines où des forces nouvelles sont nécessaires, la sismologie de la source ; la dynamique de la rupture ; l'imagerie géophysique haute résolution, notamment de la sub-surface, de la croûte et de la lithosphère ; la tectonique active ; la métrologie et l'imagerie satellitaire ; les datations des objets récents ; la modélisation des mouvements du sol ; la vulnérabilité physique.

Certains de ces recrutements devraient être préparés afin de permettre le décroisement et l'élargissement des approches évoquées précédemment.

Finalement dans le domaine du risque, les aspects éducatifs sont primordiaux afin de sensibiliser les jeunes, et pour cela, un appui à des programmes éducatifs de type « Sismo à l'école » est indispensable.

**Tableau 3. Laboratoires et nombre indicatif de chercheurs et enseignants/chercheurs potentiellement impliqués dans le thème 3 « Aléas, Risques et catastrophes telluriques »**

Laboratoire	Chercheurs et E-C
<i>IPG Paris</i>	45
<i>LMV Clermont</i>	22
<i>IPG Strasbourg</i>	15
<i>Géosciences Montpellier</i>	6
<i>Géosciences Rennes</i>	2
<i>LMTG+DTP Toulouse</i>	16
<i>LGIT+LGCA Grenoble</i>	40
<i>Geoazur Nice</i>	27
<i>Domaines Océaniques Brest</i>	5
<i>ISTO Orléans</i>	8
<i>CEREGE Aix-Marseille</i>	3
<i>ENS Paris</i>	6
<i>LPGN Nantes</i>	2
<i>IDES Orsay</i>	3
<b>Total</b>	<b>200</b>

## 4 – TERRE VIVANTE

Par nature la « paléontologie » est une science à la charnière de deux domaines : Sciences de la Vie et Sciences de la Terre. Les chercheurs paléontologues se retrouvent donc dans au moins 5 sections du Comité National (18, 19, 20, 29, 31) et dans 4 instituts (INSU, InEE, InSB, InSHS). Une réflexion parmi les paléontologues a mis en évidence quelques thématiques majeures à développer dans les années à venir, parmi lesquelles :

– évolution et développement (« evo-devo ») ;

– la dynamique de la biodiversité au cours des temps géologiques ;

– l'analyse et la mise en place des préservations exceptionnelles ;

– autres axes classiques : notamment la biostratigraphie.

De plus, il a été noté que les plateformes scientifiques les plus importantes sont les collections paléontologiques, qui méritent une attention particulière dans les années à venir, notamment en relation avec le recrutement du personnel technique et scientifique. Les collections, souvent universitaires, mais aussi distribuées à travers les différents musées, constituent effectivement un « instrument national » qu'il convient de soutenir massivement, et surtout de reconnaître officiellement.

Les paléontologues utilisent également de plus en plus de technologies de pointe (telles que spectromètres de masse, NanoSIMS, rayonnement synchrotron à l'ESRF et bientôt à SOLEIL, etc.) et une utilisation des équipements nationaux techniques est ainsi appelée à devenir de plus en plus importante. Le paléontologue est ainsi devenu un chercheur à l'interface de plusieurs disciplines, côtoyant souvent, notamment, géochimistes et géomicrobiologistes.

La géomicrobiologie est un axe émergent plutôt qu'une discipline traditionnelle. Pour développer ce domaine, il serait intéressant d'étudier de manière ambitieuse des sites d'intérêt géologique pouvant faire l'objet d'une approche intégrée en géomicrobiologie. Ces études ancrées sur l'observation de terrain devraient correspondre à de grands problèmes actuels des Sciences de la Terre parmi lesquels : processus biologiques impliqués dans les grands cycles géochimiques (C, N, P, Fe etc.), sites de stockage profond (CO<sub>2</sub>, déchets nucléaires), altération de la croûte océanique et études des biosphères intra-crustales océaniques ou continentales, serpentinitisation à basse-température et génération d'hydrogène, cycles biogéochimiques dans les sédiments océaniques, hydrates de gaz, oxydation anaérobie du méthane, fonctionnement biogéochimique de bassins versants, formation de gisements sédimentaires par le vivant (BIFs, stromatolites etc.), drainages miniers acides, analogues actuels de minéralisations anciennes...

Le comité thématique Terre Vivante de la division Sciences de la Terre de l'INSU, créé à la suite des prospectives des Sciences de la Terre (Aussois, 2008) a pour rôle d'animer et, peut être plus que tout autre comité thématique, de structurer la communauté scientifique s'intéressant aux interactions actuelles et passées entre la géosphère et la biosphère.

Ce comité regroupe des chercheurs de la communauté traditionnellement bien identifiée de la paléontologie ainsi que des chercheurs provenant de la géomicrobiologie. Ces deux communautés s'intéressent à l'histoire de la biosphère au cours des temps géologiques (impact des événements géologiques et/ou des variations des conditions paléoenvironnementales sur la biosphère), mais aussi à l'influence de la biosphère sur l'histoire physique et chimique de la surface de la Terre. Il s'agit également de comprendre le rôle du vivant dans les grands cycles géochimiques actuels, ce qui permettra notamment de mieux comprendre ce rôle dans le passé.

Certains programmes de l'INSU et du CNRS ont en partie concerné et stimulé la communauté *Terre vivante* ces dernières années : Geomex, Origines des Planètes et de la Vie, Éclipse. De nombreux chantiers restent cependant inexplorés et suscitent de nombreux espoirs en termes de retombées scientifiques. Ils sont pour l'essentiel mentionnés dans les prospectives des Sciences de la Terre.

L'étude de la *Terre vivante* nécessite par essence une approche hautement interdisciplinaire regroupant les savoirs et savoir-faire des géologues, des biologistes ainsi que des chimistes et des physiciens. Le couplage entre caractérisation des échantillons géologiques et paléontologiques par des techniques modernes d'imagerie, de géophysique ou de géochimie (notamment isotopique) et l'approche moléculaire des biologistes (séquençage, phylogénie) doit ainsi être renforcé. Les prospectives ST ont pour cela clairement souhaité le développement de fortes et indispensables interfaces avec les autres instituts du CNRS, notamment l'InEE, pour la mise en place des futures actions. Ceci a motivé le choix des membres du comité thématique Terre Vivante

qui a lancé un premier appel d'offre sur les Interactions entre la Terre et la Vie (Intervie) en 2009. Six grands thèmes principaux étaient abordés : (1) les premières traces de vie et les premiers métabolismes (Archéen) ; (2) les processus de biominéralisation ; (3) les mécanismes de la fossilisation exceptionnelle et de la taphonomie ; (4) les grandes étapes de la Vie et de la géosphère ; (5) le rôle des micro-organismes dans l'altération des roches et les cycles biogéochimiques ; (6) les études permettant une meilleure compréhension du signal isotopique dans les fossiles et/ou le vivant actuel. Ces thèmes sont parmi ceux à soutenir dans les années à venir.

## 5 – RESSOURCES GÉOLOGIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les Sciences de la Terre sont fortement impliquées dans les grands domaines scientifiques en lien avec une demande sociétale et industrielle concernant les ressources naturelles qu'elles soient minérales, énergétiques ou encore en eau. Ces thématiques nécessitent, pour leur développement, des liens étroits avec les autres EPST (IRD), les EPIC (BRGM, IFREMER, ANDRA, IFP, CEA) et les partenaires industriels (ex : Total, GDF-Suez, AREVA, Eramet, Eurogia, Schlumberger). Un effort important de structuration est en cours dans le cadre du comité thématique dédié à ce thème, afin d'étoffer et pérenniser ces liens, mais également d'améliorer la lisibilité de la communauté académique ST pour que ces partenaires puissent établir des collaborations de recherche bilatérales ou coordonner des actions plus structurées (Actions INSU, programmes, consortiums, appels d'offre ANR) sur ces thèmes.

Les questions de recherche de ce thème sont (1) les ressources naturelles énergétiques (systèmes pétroliers, dynamique des réservoirs,

ingénierie des réservoirs, aval des cycles et développement durable : stockages profonds et CO<sub>2</sub>) ; (2) les ressources naturelles minérales (les modèles métallogéniques, l'exploration des gisements cachés, les facteurs économiques) ; (3) la géothermie ; (4) l'eau.

La communauté ST française a une activité et des compétences particulières concernant des objets et des processus permettant d'aborder l'ensemble de ces questions, qui ont été structurées en 3 axes : (1) les bassins sédimentaires, (2) les eaux souterraines, (3) la métallogénie et la géochronologie des ressources minérales.

### 5.1 LES BASSINS SÉDIMENTAIRES

Dans le cadre des bassins sédimentaires, la communauté française aborde une large gamme des problématiques de ressources naturelles. Les questions scientifiques fondamentales qu'elle adresse en amont des stratégies d'exploration des ressources sont :

– Quel est, en amont, le cadre tectonique et géologique de la genèse des ressources minérales dans les cratons anciens impliquant des lithosphères chaudes marquées par un manteau lithosphérique peu résistant (structures tectoniques, métamorphisme, bassins et reliefs associés) ?

– Quels sont les temps de réponse entre les déformations (crustales ou lithosphériques), la création de reliefs et les processus d'érosion/transit/sédimentation, dans le contrôle du remplissage sédimentaire de bassins (extensifs, compressifs ou intracratoniques) et leurs implications sur les architectures stratigraphiques, l'histoire thermique et les circulations de fluides ?

– Quels sont, pendant les premiers stades de l'enfouissement des sédiments, les processus de déformation et fracturation et les réactions de transformation du matériel sédimentaire (minéraux, eaux superficielles, organismes vivants et matière organique) ?

– Comment les interactions fluides-roches modifient-elles la distribution des porosités/perméabilités et quelles sont les causes des migrations de fluides et des transferts de chaleur et de matière (anomalies thermiques, expulsion de fluides, mise en charge des aquifères, déformations du bassin)?

– Quels sont les paramètres qui contrôlent les propriétés pétrophysiques des réservoirs (sédimentologie, diagénèse, déformation) et les couplages mécaniques fluides-roches lors de l'extraction ou de l'injection de fluides dans un réservoir?

## 5.2 LES EAUX SOUTERRAINES

La recherche sur les systèmes hydrogéologiques est motivée autant par la question des ressources que par celle du stockage de déchets énergétiques (déchets radioactifs, CO<sub>2</sub>). L'enjeu scientifique majeur est l'identification des processus physico-chimiques et des structures de circulation et de transport en vue de la prédiction de l'évolution des ressources et des stockages. C'est un enjeu qui a été et reste en prise directe avec une demande sociétale extrêmement forte. Les principaux verrous scientifiques concernent :

– l'identification des interactions eau/roche/vie et de la réactivité dans les aquifères qui ont un impact majeur sur la qualité des eaux (biodégradation passive et bioremédiation active, confrontation d'études in situ et en conditions contrôlées en laboratoire)

– la quantification des interactions entre différents compartiments hydrogéologiques (aquifère, aquitard, surface-subsurface, réservoirs profonds; processus de recharge avec la zone non-saturée; caractérisation par la géochimie des eaux, de l'impact des changements climatiques, biologiques et anthropiques).

– la localisation des circulations, du transport et de la réactivité a un impact majeur sur les processus physico-chimiques (méthodes de caractérisation géophysiques et hydrauliques, genèse des structures de réservoirs).

– l'intégration des données de différentes disciplines, à différentes échelles dans une compréhension cohérente des circulations, du transport et de la réactivité (changement d'échelle et identification des paramètres et structures hydrauliques).

– la modélisation de processus physico-chimiques complexes couplés (développement de méthodes numériques adaptées, conditionnement par le milieu géologique, modifications et incertitudes).

### Les enjeux méthodologiques

Les enjeux méthodologiques concernent l'observation pérenne de sites, le soutien des méthodologies des disciplines connexes à l'hydrogéologie et le développement de plateformes de simulation. Il s'agit de :

– concentrer les moyens sur un nombre limité de sites d'observations labellisés bien instrumentés et suivis sur le long terme ;

– soutenir les disciplines connexes (l'hydrogéophysique et l'hydrochimie, les méthodes de modélisation issues des mathématiques appliquées);

– développer des plateformes de simulation des processus complexes couplés, qui soient à la fois unifiées, ouvertes et génériques pour une large gamme de problèmes (coopération entre instituts à l'échelle française et européenne).

### Forces et faiblesses de la communauté française

La situation de la recherche en France sur ces thématiques est paradoxale. D'un côté, on recense un grand nombre d'acteurs institutionnels (EPST, EPIC, ministères, universités...) et de nombreuses associations scientifiques nationales (AIH, CFH, AFES, Société Hydrotechnique de France, Groupe Français des Argiles...) qui jouent un rôle considérable de promotion de leur propre discipline, d'animation de la réflexion sur les problématiques envi-

ronnementales, et de formation des ingénieurs et des experts. D'un autre côté, même s'il existe des exceptions notables, la recherche française n'est pas compétitive vis-à-vis de celle pratiquée aux États-Unis et dans certains pays européens (Allemagne, Angleterre, Italie, Suisse).

L'implication de la communauté des Sciences de la Terre reste très modeste, essentiellement centrée sur quelques grands enjeux sociétaux et industriels : le stockage souterrain des déchets radioactifs (collaboration CNRS-ANDRA), la séquestration du CO<sub>2</sub>, et les études sur les climats anciens.

Les forces de la communauté française sont dans l'existence de communautés performantes et bien structurées dans les domaines connexes de l'hydrogéologie comme la géophysique et la géochimie. Les faiblesses sont le faible nombre de groupes académiques avec une masse critique dans les problématiques propres à l'hydrogéologie. Cela vient à la fois de l'émiettement de l'hydrogéologie dans les universités et du faible vivier de candidats français sur des thématiques hydrogéologiques et, par conséquent, d'un faible taux de recrutement. Les solutions sont le développement des formations par la recherche (doctorants et post-doctorants), le recrutement de chercheurs étrangers et une politique volontariste du CNRS.

## 5.3 LA MÉTALLOGÉNIE DES RESSOURCES MINÉRALES

### Les enjeux scientifiques

L'amélioration des modèles métallogéniques repose sur 3 aspects.

- Du point de vue minéralogique, pétrographique et expérimentation : le développement de l'analyse des constituants des gisements et de leurs encaissants, la caractérisation des relations de phases, l'identification et la description de nouvelles espèces.

- Du point de vue de la géochimie : le traçage des sources des métaux, des ligands (soufre et chlore), des fluides ; l'origine des

salinités ; les mécanisme de dépôt des métaux (mélange ; dilution, redox)

- Du point de vue de la géochronologie : la datation de la mise en place des minéralisations (U-Pb, Ar-Ar, Re-Os), la caractérisation du polyphasage des gisements, la détermination des relations des gisements avec la géodynamique, les paléstructures (organisation des bassins, discordances par exemple).

La prise en compte des facteurs économiques est aujourd'hui capitale dans la conduite d'une politique d'approvisionnement en matières premières et repose sur les questions scientifiques suivantes :

- quels sont les paramètres contrôlant la formation des gisements « géants » ?

- comment se distribuent les gisements les plus importants dans les principales ceintures minéralisées ?

- comment évoluent les politiques de prix des matières premières (cycles, bourses, spéculations) et de réorganisation des acteurs industriels (concentration, interactions juniors-majors) ?

### Les enjeux méthodologiques

Des progrès décisifs en matière d'exploration de gisement cachés viendront de deux technologies complémentaires en pleine évolution aujourd'hui :

- la géophysique aéroportée haute résolution sur laquelle les équipes de recherche française doivent absolument s'investir ;

- la modélisation 3D géologie-géophysique couplant géométrie et propriétés physiques des roches, pour laquelle l'expertise française est clairement reconnue (plateforme Gocad et Géomodelleurs).

### Forces et faiblesses de la communauté française

La France, grâce à la qualité de ses équipes de recherche et de ses plateformes analy-

tiques, possède une expertise internationale reconnue en métallogénie à la fois dans le cadre des organismes comme le BRGM, l'IRD ou l'IFREMER que dans le milieu académique (Université et CNRS/INSU). Nos points forts sont :

- notre présence sur quelques grands terrains emblématiques dans le domaine des matières premières: Canada (AREVA-CREGU), Afrique de l'Ouest, Maroc (Groupe de recherche Toulouse-IRD ; BRGM, CRPG), Europe centrale et occidentale Roumanie, Espagne (G2R, Orléans), Nouvelle-Calédonie (IRD), Russie (AREVA-CREGU) ; Afrique du Sud (Rennes, Paris-IPGP, Grenoble) ;

- poursuite du développement d'un domaine d'expertise dans la micro-analyse ponctuelle des fluides et de leurs constituants (microsonde nucléaire, micro spectrométrie Raman, Synchrotron, etc.).

- l'expérimentation et la modélisation numérique des fluides transportant et déposant les métaux.

La communauté souffre cependant d'un certain manque de lisibilité internationale et manque actuellement d'une structure d'animation. Elle a de plus des effectifs réduits, dispersés dans une dizaine d'Universités. Le renouvellement des ressources humaines en métallogénie apparaît ainsi aujourd'hui comme un élément incontournable d'une politique cohérente dans le domaine des matières premières. La France possède un certain nombre d'experts mondialement reconnus dans les domaines de la géologie de l'uranium, des métaux de base (Cu-Pb-Zn-Ni-PGE), des gemmes notamment. Le renouvellement de ces cadres sera nécessaire.

Enfin, une politique de recherche dans le domaine des matières premières doit nécessairement s'appuyer sur un réseau associant partenaires industriels et académiques. (groupements d'intérêts partagés, programmes nationaux, structures R&D à finalité commerciale, bourses de recherche BDI, CIFFRE, etc.). Les réussites du groupe CREGU et du consortium GOCAD dans ce domaine constituent des exemples positifs à développer.

## 6 – BILAN DES RECRUTEMENTS ET ÉTAT DU VIVIER

### 6.1 BILAN DU RECRUTEMENT 2005-2010

**Tableau 5. Recrutements (CR) par unité entre 2005 et 2010 (résultats du jury d'admissibilité pour 2010)**

Laboratoire	Nb	% effectif CNRS	% effectif total
<i>MNHN LMCM</i>	2	50	14
<i>ENS Lyon</i>	3	27	10
<i>LGCA Grenoble</i>	2	25	6
<i>UMET Lille</i>	2	20	6
<i>PEPS Lyon</i>	2	20	6
<i>LPNG Nantes</i>	1	20	3
<i>IDES Orsay</i>	1	20	3
<i>LGIT Grenoble</i>	4	19	7
<i>CRPG Nancy</i>	2	17	7
<i>Géosystèmes Lille</i>	1	17	2
<i>IPG Paris</i>	6	14	4
<i>LMV Clermont</i>	2	13	3
<i>LMTG Toulouse</i>	3	13	3
<i>ENS Paris</i>	2	13	10
<i>Géoazur Nice</i>	2	13	3
<i>Biogéosciences Dijon</i>	1	13	3
<i>Geosc. Montpellier</i>	3	9	4
<i>MNHN CR2P</i>	1	8	2
<i>Géosciences Rennes</i>	2	8	4
<i>ISTO Orléans</i>	1	8	2
<i>Dom. Océan. Brest</i>	1	7	3
<i>IPG Strasbourg</i>	1	7	2

Laboratoire	Nb	% effectif CNRS	% effectif total
LSCE Gif	1	3	1
CEREGE Aix	1	3	1
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>11</b>	<b>3</b>

**Tableau 6. Recrutements par métier et par thème entre 2005 et 2010 (résultats du jury d'admissibilité pour 2010)**

Métier	Nb	Thème	Nb
Expérimentation	7	Biostratigraphie	1
Géochimie	11	Cosmochimie	2
Géochronologie	1	Croute océanique	3
Géophysique	6	Cycle sismique	3
Gravimétrie	1	Érosion	1
Magnétisme	4	Fossilisation	1
Modélisation	7	Géodynamique	3
Paléomagnétisme	1	Int. Fluides roche	2
Paléontologie	4	Mécanique des roches	1
Stratigraphie	1	Paléo-environnement	4
Tectonique	2	Sismologie	2
		Stockage CO <sub>2</sub>	1
		Système solaire	1
		Tectonophysique	2
		Terre profonde et primitive	14
		Vertébrés	2
		Volcanologie	2
		Magnétisme	1

## 6.2 BILAN DU VIVIER 2009

Nous présentons ci-dessous quelques données concernant les concours CR 2009 :

- 3 postes de CR2 et 2 postes de CR1 ont été mis au concours avec 3 coloriages

- 60 auditions de candidats CR1 et CR2 (12 mn) suivies d'un entretien (10 mn) ont été réalisées ;

- âges des candidats : 26 à 37 ans, moyenne autour de 30 ans ;

- dates de soutenance des thèses de doctorat entre 2003 et 2008.

Sur 23 candidats dont les dossiers ont été jugés les meilleurs, 10 présentent des projets sur la Terre interne et 13 sur la Terre externe incluant l'hydrologie. Le spectre est donc large dans les fondamentaux de nos disciplines, mais également aux frontières.

Bien qu'il soit souvent difficile de classer les candidats par catégories de disciplines puisque certains projets font appel à plusieurs méthodes ou approches, les profils de ces 23 candidats se répartissent ainsi :

- 5 en géochimie, 2 en pétrologie, minéralogie, 10 en géophysique, physique, mécanique des fluides ou modélisation, 3 en géologie, tectonique, géodynamique, 3 en paléontologie.

- Sur ces 23 candidats, 3 satisfont aux coloriages.

- Parmi ces 23 candidats, les candidats CR2 sont auteurs de 3 à 16 publications chacun et ont effectué entre 0 et 4 post-docs.

La répartition des laboratoires d'accueil proposés dans les dossiers se superpose assez bien à celle de l'ensemble des laboratoires de l'INSU sur le territoire national.



# 19

---

## **SYSTÈME TERRE : ENVELOPPES SUPERFICIELLES**

*Président de la section*

Michel FILY

*Membres de la section*

Stéphane ALFARO

Sandrine ANQUETIN

Michel ARHAN

Yves BARBIN

Ilhem BENTALEB

François CARLOTTI

Cathy CLERBAUX

Rudolph CORVAISIER

Georges DURRY

Christophe GENTHON

Emmanuel LELLOUCH

Gurvan MADEC

Patrick MARCHESIELLO

Alain MARHIC

Laurent MENUT

Pascale ROY-DELECLUSE

Karine SELLEGRI

Christian TAMBURINI

Gérard THOUZEAU

Laurence VIDAL

### **INTRODUCTION**

La recherche menée sur les thématiques océan-cryosphère-atmosphère relevant de la section 19 est très fortement structurée par l'INSU qui, en particulier, organise régulièrement des colloques de prospective. Le dernier colloque concernant OA a eu lieu à Lille en 2006. Le prochain colloque est en cours d'organisation, il aura lieu à Grenoble en février 2011 et apportera une vue globale du bilan et des perspectives bien plus complète que le travail que pourrait effectuer la seule section. Nous reprenons donc ici essentiellement les conclusions du dernier rapport car elles sont toujours d'actualité avec un réajustement en fonction des évolutions depuis lors, en particulier en ce qui concerne les moyens humains. Nous notons également qu'un important travail de prospective à long terme a été réalisé par le Conseil Scientifique du Département Planète-Univers au printemps 2007. Ce document est encore d'actualité et est complémentaire de la dernière prospective OA.

La section 19 inclue aussi la thématique planétologie, et pour ce thème le texte s'appuie essentiellement sur le travail réalisé par la communauté Astrophysique lors de ses journées de prospectives qui se sont tenues en 2009.

# 1 – THÉMATIQUES ET PRIORITÉS SCIENTIFIQUES

## 1.1 OCÉAN-CRYOSPHERE-ATMOSPHERE

La première mission de la communauté scientifique concernée par les thématiques de recherche couvertes par la section 19 du Comité National est d'observer, comprendre et modéliser le fonctionnement de l'océan, de l'atmosphère et de la cryosphère. Au travers de leur couplage, il s'agit également d'étudier le fonctionnement du système climatique et des cycles biogéochimiques ainsi que leur évolution à différentes échelles de temps et d'espace.

Les connaissances ainsi acquises doivent également servir à proposer des réponses aux demandes sociétales très fortes concernant l'impact de l'activité humaine sur le devenir de la planète et plus concrètement sur le changement climatique, la biodiversité, la pollution atmosphérique, les ressources halieutiques, etc., en un mot la gestion durable de l'environnement.

Au cours des dernières années, les recherches menées sur le fonctionnement des enveloppes fluides (océan, atmosphère et cryosphère) ont été marquées principalement :

– par le développement de techniques d'observations in situ (à la fois au niveau des capteurs qu'au niveau des engins porteurs) ou par télédétection de plus en plus performantes, tant en termes de nature des variables observées qu'en terme de couverture et résolution spatiales et temporelles. Les données issues des techniques de dernières générations permettent de mieux cerner l'importance de phénomènes à plus haute hauteurs fréquences spatio-temporelles indispensables pour comprendre le fonctionnement des enveloppes fluides (mésos-échelle atmosphérique et océanique, par exemple). La dernière décennie a été caractérisée par l'arrivée des satellites dédiés à l'observation de la Terre qui ont

conduit à l'acquisition de jeux de données très importants tant en qualité qu'en quantité. Outre leur apport direct à l'observation des milieux, ces données ont modifié, par leur caractère global et temporellement récurrent, le lien existant entre observations et modélisation, notamment par le biais de l'assimilation de données. On notera également le renouvellement récent des avions de recherche et de l'instrumentation aéroportée ainsi que celui des navires océanographiques des stations marines ;

– parallèlement, ces communautés de recherche ont développé des modèles de plus en plus performants, couvrant une grande gamme d'échelles spatiales et permettant de décrire, et souvent de prévoir de façon opérationnelle, l'évolution de ces milieux. Les systèmes de modélisation MERCATOR (océanographie opérationnelle) ou PREV'AIR (prévision opérationnelle de la qualité de l'air) sont deux exemples typiques de ces avancées.

L'intégration des surfaces continentales, des surfaces englacées et des cycles biogéochimiques dans des modèles climatiques couplés océan-atmosphère-continent a conduit à l'élaboration d'outils permettant de mieux cerner le fonctionnement de la planète, en particulier de son climat, de sa dynamique naturelle (cycles climatiques, événements extrêmes, etc.) et surtout son évolution future sous l'effet des changements anthropiques. Les contributions très importantes apportées par la communauté nationale au récent rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, en anglais IPCC) en sont une illustration.

Aujourd'hui, ces avancées majeures dans le domaine de l'observation et de la modélisation conduisent à une inflexion significative des priorités de recherche. D'une phase où l'essentiel du travail consistait d'une part à acquérir des données pertinentes permettant de quantifier et formaliser les processus mis en jeu et d'autre part à intégrer ces processus dans des outils numériques, les recherches futures, sans abandonner les études de processus encore mal compris, s'orientent vers la mise au point et l'application de méthodes permettant la qualification de ces outils et la réduction

des incertitudes associées aux simulations. Ces démarches vont évidemment nécessiter des interactions fortes entre modèles et observations, via des techniques de haut niveau (assimilation de données, transferts d'échelle et paramétrisations associées, modélisation d'ensemble).

Par ailleurs, la démarche généralement adoptée dans les années passées, visant à traiter séparément les différents compartiments du système terrestre avant de les inclure dans des modèles plus intégrés conduit nécessairement à des difficultés de représentation des interfaces, en particulier des processus propres à ces milieux de transition. Une attention particulière devra donc être portée à l'étude spécifique de ces interfaces, en considérant en particulier la nécessité d'étudier simultanément des processus dont les constantes de temps peuvent être très différentes. Ceci ne pourra se faire sans la mise en place de projets interdisciplinaires, nécessairement inscrits dans la durée.

Enfin, l'évolution prévue de notre environnement aura des conséquences majeures sur les conditions de vie des populations tant sur le plan de la santé publique (épisodes de pollution, période de canicule, tempêtes, etc.) qu'en terme économique (évolution des zones climatiques avec des impacts sur différentes formes d'exploitation de la productivité des écosystèmes (ressources vivantes et agricultures), la consommation d'énergie, le tourisme, etc.). Les scientifiques ont donc la responsabilité d'élaborer des outils fiables et opérationnels de diagnostic de l'évolution de ces milieux mais également d'assurer le couplage de ces outils « physiques » avec des modèles socioéconomiques permettant in fine une quantification fiable des risques et des coûts, au service de politiques environnementales raisonnées.

Une grande partie de ces préoccupations est partagée par d'autres pays. Le cadre européen, notamment au travers du programme GMES, devrait permettre une collaboration internationale efficace sur ces questions.

Quantifier et réduire les incertitudes sur la modélisation du système Terre, mieux prendre

en compte les processus aux interfaces et développer des outils de gestion/observation de l'environnement sont donc les priorités affichées par notre communauté.

Les principaux efforts en terme de moyens à associer à ces objectifs sont de :

- maintenir à niveau nos outils de calcul pour rester compétitif au plan international. Ceci est indispensable si l'on veut conserver notre capacité à réaliser des simulations climatiques couplées et mettre en place les systèmes opérationnels de gestion de l'environnement. Il y a là un enjeu majeur qui dimensionnera fortement la capacité de la communauté nationale à se positionner au meilleur niveau international sur ces questions ;

- maintenir les capacités d'observations, fondements de nos disciplines. On mentionnera, en particulier, la nécessité d'assurer la pérennité des services d'observations à long terme et le soutien continu à apporter aux études en laboratoire ou *in situ* visant à améliorer notre compréhension des processus fondamentaux ;

- étudier les processus aux interfaces nécessaire, comme mentionné ci-dessus, la mise en œuvre de campagnes interdisciplinaires inscrites dans la durée. Ceci est difficile à organiser et à réaliser sans une forte volonté politique. Le programme international AMMA, piloté par la communauté scientifique française, a été focalisée sur les interactions océan-surfaces continentales-atmosphère. C'est à la fois une réussite majeure de notre communauté en matière de multidisciplinarité et un exemple du type d'action à mener. Un programme du même type devra être nécessairement initié pour étudier spécifiquement les interactions continents-océans, des bassins versants hydrographiques aux canyons des plateaux continentaux. Les chantiers Méditerranée et Arctique pourrait fournir des cadres pertinents à ce type d'études tout en favorisant la prise en compte des questions sociétales liées aux zones littorales ;

- maintenir et renforcer les nécessaires partenariats nationaux et internationaux. Depuis de nombreuses années, dans le domaine des sciences de l'environnement, l'INSU (et au tra-

vers de celui-ci le CNRS) a joué un rôle fédérateur essentiel. L'objectif était de mettre en œuvre une stratégie de recherche basée sur un partenariat fort avec les autres organismes nationaux concernés (Universités, ADEME, CEA, CNES, Météo-France, IFREMER, INRA, IPEV, IRD, SHOM, etc.). Aucune des avancées mentionnées ci-dessus n'aurait pu avoir lieu sans cette programmation inter-organisme. Il est donc essentiel que ce partenariat (et les conditions pour le réaliser), très bénéfique pour la communauté scientifique, soit maintenu, voire renforcé. Par ailleurs, comme mentionné précédemment, les enjeux décrits ci-dessus sont des enjeux partagés par la communauté internationale au travers de programmes comme GEO, IGBP ou GMES. Les objectifs opérationnels en matière de gestion de l'environnement que se sont fixés ces programmes requièrent des recherches amont et des moyens importants qui ne pourront être mis en œuvre sans une coopération internationale forte. La communauté française est scientifiquement au meilleur niveau international dans ces domaines et est positionnée pour assurer un rôle de pilote dans ces programmes. Il appartient maintenant aux organismes de recherche, et au CNRS en premier lieu, de lui fournir les moyens lui permettant d'assumer ce rôle initiateur et moteur au sein de ces programmes internationaux dont l'impact socio-économique sera très important ;

– assurer les moyens humains nécessaires à la réalisation de ces objectifs. En particulier, on doit souligner que la diminution continue des personnels ITA et IATOS dans les unités relevant de la division Océan-Atmosphère (OA) est très inquiétante pour notre capacité à assurer dans l'avenir la continuité de l'acquisition et du traitement des observations et le développement et la maintenance des modèles numériques.

## 1.2 PLANÉTOLOGIE

La planétologie comparée, et plus spécifiquement l'étude des atmosphères planétaires, est également l'une des thématiques relevant

de la section 19. A l'interface avec certaines des activités de la section 17, cette recherche utilise des techniques observationnelles relevant de l'exploration spatiale et des outils de modélisation directement inspirés et dérivés des modèles terrestres. Du point de vue observationnel, les années en cours sont particulièrement riches, avec plusieurs missions spatiales actuellement en opération autour de Vénus, Mars, et du système Saturne/Titan. Le futur de l'exploration martienne est également prometteur avec à court et moyen terme la mise en service de Mars Science Laboratory et plus tard d'ExoMars, dont une partie des objectifs scientifiques seront clairement tournés vers l'exobiologie. De manière très générale, en termes de science atmosphérique, ces missions fournissent des champs de paramètres météorologiques de plus en plus complets et résolus dans le temps. Les modèles de circulation générale et de climat de ces objets, dont les premiers développements à partir de codes terrestres datent des années 1990, permettant maintenant d'interpréter ces résultats observationnels dans une approche résolument comparative. La diversité et les similitudes des régimes de circulation et de processus physiques sont désormais évidentes, justifiant le développement en parallèle d'outils adaptés aussi bien au cas de la Terre qu'aux autres planètes (modèles méso-échelle par exemple). Dans le cas de Mars, la compréhension de la climatologie actuelle est suffisante pour que l'on puisse s'attaquer à la reconstitution du climat passé – là encore, les données spatiales fournissent de précieuses contraintes – avec confiance. Ceci permet d'aborder des questions fondamentales comme celle de l'habitabilité passée de Mars.

Les aspects liés à l'analyse des moyens humains disponibles et leur évolution, l'enseignement et le cadre international dans lequel sont menées ces recherches sont détaillés dans les chapitres suivants.

## 2 – MOYENS HUMAINS ET ÉVOLUTION

recouvrent pour l'essentiel les thématiques de la section 19 à l'exception de l'étude des atmosphères planétaires) ainsi que de ceux donnés par le Secrétariat Général du Comité National, eux-mêmes basés sur Labintel.

### 2.1 UNITÉS DE RECHERCHE

Nous disposons des chiffres donnés par la division Océan-Atmosphère de l'INSU, qui

#### Liste des laboratoires relevant de la section 19 comme section principale

Code unité	Sigle unité	Intitulé unité	
UMR1572	LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	SACLAY/GIF SUR YVETTE
UMR5110	CEFREM	Centre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin	PERPIGNAN
UMR5183	LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement	GRENOBLE
UMR5210	CRC	Centre de Recherches de Climatologie	DIJON
UMR5560	LA	Laboratoire d'Aérodynamique	TOULOUSE
UMR5566	LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales	TOULOUSE
UMR5805	EPOC	Environnements et Paléoenvironnements Océaniques	BORDEAUX/TALENCE
UMR6016	L.A.M.P	Laboratoire de Météorologie Physique	CLERMONT FERRAND
UMR6017	L.S.E.E.T	Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre	TOULON
UMR6117	LMGEM	Laboratoire de Microbiologie, de Géochimie et d'Ecologie Marines	MARSEILLE
UMR6523	LPO	Laboratoire de Physique des Océans	BREST
UMR6535	LOPB	Laboratoire d'Océanographie Physique et Biogéochimique	MARSEILLE
UMR6539	LEMAR	Laboratoire des sciences de l'Environnement Marin	BREST (INEE)
UMR7093	LOV	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche	VILLEFRANCHE SUR MER
UMR7159	LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques	PARIS
UMR7583	LISA	Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques	CRETEIL
UMR7621	LOBB LOMIC	Laboratoire d'Océanographie Biologique de Banyuls devenu Laboratoire d'Océanologie Microbienne	BANYULS SUR MER
UMR8105	LACy	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones	ST DENIS LA REUNION
UMR8187	LOG	Océanologie et Géosciences	WIMEREUX
UMR8190	LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales	PARIS/GUYANCOURT
UMR8518	LOA	Laboratoire d'Optique Atmosphérique	LILLE
UMR8539	LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique	PARIS/PALaiseau

Code unité	Sigle unité	Intitulé unité	
URA1357	GAME	Groupe d'Étude de l'Atmosphère Météorologique	TOULOUSE
URA1875	CERFACS	Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	TOULOUSE

Au 1<sup>er</sup> octobre 2008, 24 unités de recherche (22 UMR et 2 URA) étaient rattachées principalement à la section 19, au lieu de 25 en 2005. En 2009 on peut noter la création du LATMOS, issu du SA (Service d'Aérodynamique) et du CETP (Centre d'Études Terrestres et Planétaires). La situation est donc très stable avec très peu de petits laboratoires et donc relativement peu d'évolution à envisager à court terme. Il faut également ajouter une vingtaine d'unités supplémentaires (18 UMR, 1 UPR) pour lesquelles la section 19 est section secondaire. Ces dernières unités sont pour partie des unités rattachées à une autre section couvrant des thématiques de l'INSU (sections 17 et 18) mais on notera que près de la moitié de ces unités relève d'autres Instituts et en particulier de l'INEE (section 20) pour 5 d'entre elles. A contrario 6 unités sur 24 ayant comme section principale la 19 ont la 20 en deuxième. Il est probable que ce chiffre augmente, cela dénote l'intersection forte entre les deux sections 19 et 20, ainsi qu'entre les deux instituts INSU et INEE.

Une autre manière de voir l'interdisciplinarité est de regarder le nombre et le pourcentage des chercheurs 19 travaillant dans une unité dont la section principale est autre : 64 chercheurs sur 292, soit 22 %, sont dans ce cas.

Aux UMR on peut rajouter 9 UMS dont 8 correspondent à des OSU et 1 à l'unité SAFIRE pour la gestion des avions, 3 UPS (CIRMED, CIRMAT et DT-INSU) et 2 FR (Station Biologique de Roscoff et IPSL)

## 2.2 POTENTIEL CHERCHEURS

Concernant les chercheurs, par rapport à l'ensemble du CNRS la section 19 est relativement jeune et ne devrait donc pas voir de changements majeurs dans les années à venir.

	25-35 ans	35-45 ans	45-55 ans	55-65 ans	Total
Section 19	43 (15%)	98 (34%)	101 (35%)	50 (17%)	292
Total CNRS	14%	30%	32%	24%	11 867

Dans les unités il faut enfin faire apparaître le poids important des chercheurs d'autres organismes :

- en premier lieu viennent les enseignants-chercheurs (EC) : environ 342 EC (recensement début 2010) sont rattachés aux laboratoires relevant de la section 19.

- le poids de l'IRD (47 chercheurs) devient important dans beaucoup d'unités et cela représente un phénomène très récent suite à la politique volontariste de l'IRD « d'UMRisation » de ses unités (par exemples : + 8 permanents au LOCEAN en 2009 ; +5 au LPO en 2008 ; 19 chercheurs et 9 ITA IRD pour le projet de labo MIO (Mediterranean Institute of Oceanography) qui sera présenté vague B à Marseille-Toulon)

- l'apport de Météo-France se fait presque exclusivement au travers du GAME et du CERFACS à Toulouse (77 chercheurs), celui du CEA (53 chercheurs) via le LSCE à Saclay et celui de l'IFREMER à Brest dans les unités de l'IUEM (6 chercheurs).

## 2.3 POTENTIEL INGÉNIEURS, TECHNICIENS ET ADMINISTRATIFS

Dans le cadre de la prospective INSU-OA, un rapport est en cours de rédaction par R. Bellenger et collaborateurs sur l'emploi IT à l'INSU. Un travail d'enquête approfondie est également en cours dans le cadre de la pros-

pective Océan-Atmosphère. Ces études seront bien plus complètes et pertinentes que ce qui peut être fait dans le cadre de la section. Uniquement quelques éléments sont donc donnés dans le cadre de ce rapport.

Les chiffres nous ont été communiqués par R. Bellenger de l'INSU. Ils se réfèrent aux laboratoires de la division scientifique de l'INSU et reflètent la base LABINTEL à la date de février 2010 (il faut continuer de renseigner au mieux cet élément de référence). Ces laboratoires ne couvrent pas exactement les laboratoires dont la section 19 est principale. Il manque en particulier le LEMAR à Brest, le LOG à Wimereux et le CRC à Dijon. Il manque aussi la plupart des UMS (voir le 2.1.) Néanmoins les statistiques globales sont certainement valables pour l'ensemble des laboratoires de la section 19. Par contre il est difficile d'évaluer l'évolution globale depuis 2006 car les méthodes ont changé. Seule l'évolution pour les IT CNRS est connue avec suffisamment de précision.

En préambule, il est indispensable de rappeler que les IT forment, au même titre que les chercheurs et les enseignants-chercheurs, une composante indispensable de la recherche dans notre discipline où l'observation et la mesure, et donc les développements techniques associés, sont indispensables à l'avancée des connaissances. Le CNRS et ses personnels ont joué et doivent toujours jouer un rôle moteur et animateur dans l'évolution, le développement, et la transmission du métier d'ITA scientifique : mutualisation des connaissances et circulation des compétences nouvelles et aussi des hommes. Les personnels des autres organismes qui travaillent dans les labos se reconnaissent aussi dans la vie du centre et, en particulier les IATOS des Universités, souhaitent avoir un meilleur accès aux actions organisées par et pour les agents du CNRS (formation, ateliers...)

Au total, pour les laboratoires OA, on recense à ce jour 603 IT pour environ 800 chercheurs tous organismes confondus. Le CNRS est bien le principal organisme qui y contribue avec 320 IT pour environ 300 chercheurs en section 19. Une politique soutenue de recrute-

ment du CNRS dans ce domaine est donc déterminante pour nombre d'unités. Ensuite vient Météo-France (118 IT) dont les moyens humains sont presque exclusivement au GAME à Toulouse. L'Université n'arrive qu'en troisième position (76 IT) alors que plus de 300 enseignants-chercheurs sont rattachés à des unités OA. Comme dans le dernier rapport on ne peut donc que rappeler qu'il est primordial que l'Université développe son investissement en ITs dans les UMR. Les ITs du CEA (39) sont presque exclusivement rattachés au LSCE à Saclay. Comme pour les chercheurs une des évolutions importantes en cours est celle du rattachement des équipes IRD à des UMR de la section ; 22 ITs étaient issus de l'IRD en février 2010.

La pyramide des âges montre que les années à venir seront encore marquées par de nombreux départs. Le recours massif aux CDD (20% et plus, hors post-doc, d'après document en préparation pour la prospective OA), solution parfois acceptée « faute de mieux », produit souvent des pertes de compétences, un émiettement dans la vie technique des laboratoires, et un moindre investissement sur la culture professionnelle scientifique qui est un atout fort dans l'accompagnement de l'activité des chercheurs. Notre discipline demande le plus souvent une adaptation à la fois au travail de laboratoire, mais aussi au travail de terrain qui nécessite une grande autonomie des agents. La forte implication dans la vie des programmes de recherche est génératrice et mobilisatrice de cette autonomie.

En période de restriction d'embauche, la mutualisation des compétences techniques aux seins des équipes ou de laboratoires rapprochés est une idée de bon sens, il faut accompagner son expérimentation et vérifier ce qu'en sont les effets sur la qualité du travail (la réponse au besoin, la capacité d'initiative) et aussi sur le vivre des agents (attractivité, reconnaissance). Il est indispensable d'écouter les propositions des agents et de les associer dans la vie de notre discipline.

## 3 – FORMATION-ENSEIGNEMENT

Le domaine océan-atmosphère est un domaine de recherche relativement nouveau (quelques décennies) et son implantation dans les universités reste très hétérogène. Il est difficile de présenter une étude exhaustive de l'implication universitaire de ces disciplines, mais des indications peuvent être obtenues au travers :

- d'une analyse du dispositif universitaire (analyse « géographique » du nombre d'enseignants-chercheurs, de leur répartition, etc.) ;

- d'une évaluation de la contribution de nos disciplines à l'offre de formation des universités.

Les données proviennent essentiellement du MESR (étude mai 2010) et du CNU, section 37.

### 3.1 LE DISPOSITIF UNIVERSITAIRE

Les laboratoires rattachés principalement à la section 19 sont répartis sur 14 villes universitaires sans changement notable par rapport à 2006. On peut quand même noter la montée en puissance de l'Université de la Réunion au sein de laquelle le LACy et l'OSU jouent un rôle majeur.

Le nombre d'enseignants-chercheurs, professeurs (PR) et maîtres de conférences (MC), dans les laboratoires est, en février 2010, de l'ordre de 300 auxquels il faut ajouter 25 personnels du corps du CNAP. Ce personnel universitaire n'est pas rattaché à une seule section du CNU. On les retrouve dans beaucoup de sections de chimie, physique, biologie, sciences de la terre, instrumentation, informatique, démontrant la pluridisciplinarité de ce domaine de recherche. Cependant, la section 37 du CNU rassemble la presque totalité des atmosphériciens, des glaciologues et des

océanographes physiciens, la section 67 rassemblant quant à elle la majorité des biologistes PU.

Au 31 décembre 2009, 182 EC étaient rattachés à la section 37 du CNU (62 PR et 120 MC). La grande majorité d'entre eux sont rattachés à des laboratoires relevant de la section 19 en section principale (148 dont 54 PR et 94 MC) ou en section secondaire (1 PR et 6 MC). Il s'agit donc d'un apport important qui peut participer potentiellement à l'enseignement de nos disciplines au sein de l'université, dont certaines, telle la biogéochimie marine, sont à l'interface de différentes sections du CNU.

### 3.2 L'OFFRE DE FORMATION

Le nouveau dispositif Licence, Master, Doctorat (LMD) a été mis en place progressivement dans les universités françaises à partir de 2003. La nouvelle offre de formation en masters a souvent été une opportunité pour nos disciplines, en général attractives, pour occuper un nouvel espace dans l'offre universitaire de formation.

L'implication de nos disciplines dans la formation en Master est extrêmement diverse d'une université à l'autre. Suivant le poids des laboratoires (et de l'histoire), certaines universités proposent des Masters très bien adaptés à la formation souhaitée pour nos disciplines, tandis que dans d'autres, les formations sont soit pluridisciplinaires, soit plus généralistes, ce qui n'est pas, a priori, un handicap mais peut être, au contraire, une source de diversification des recrutements.

L'ensemble des Masters dispensés dans les 14 sites universitaires abritant les laboratoires rattachés principalement à la section 19 proposent 22 enseignements de spécialités qui correspondent en partie ou totalement aux domaines de recherche de la Section 19. Les 24 laboratoires de la division océan-atmosphère sont rattachés à une douzaine d'écoles doctorales. Sept de ces écoles doctorales (Île-

de-France, Aix-Marseille, Brest, Grenoble, Montpellier, Perpignan, et Toulouse) sont très majoritairement PU (au lieu de 4 seulement en 2006), les autres étant pluridisciplinaires. Ces écoles doctorales d'étiquette PU sont donc en augmentation et correspondent à des sites où les laboratoires PU sont bien implantés.

En conclusion, les thématiques de la section 19, par nature non disciplinaires, constituent rarement des domaines d'enseignement de base dans les cursus universitaires comme peuvent l'être la chimie, la physique ou la biologie. Néanmoins, le nombre d'enseignants-chercheurs impliqués dans des recherches en océan-atmosphère est loin d'être négligeable mais la section CNU37 est également relativement petite.

Ceci permet de proposer une offre de formation au niveau Master et Doctorat relativement riche et cohérente au niveau national. La dimension « environnement » de ces filières est généralement forte et semble être un élément d'attractivité pour les étudiants. La tendance aujourd'hui est également de proposer des formations intégrées (droit-environnement, énergie-environnement, économie-environnement, etc.) qui sont souvent pilotées par des chercheurs ou ED d'autres disciplines mais font appel aux chercheurs et EC de la communauté OA. C'est un défi pour notre communauté de rester présent sur ces nouveaux enseignements.

## **4 – STRUCTURATION NATIONALE ET CADRE INTERNATIONAL**

### **4.1 STRUCTURATION NATIONALE**

Comme mentionné précédemment, la communauté nationale impliquée dans les thématiques océan-atmosphère-cryosphère est bien structurée, en grande partie grâce au

rôle de coordination assuré par l'INSU. Bien évidemment, cette démarche inter-organismes est imposée d'abord par la nécessité de regrouper les forces pour mettre en œuvre les moyens lourds que demandent les sciences de l'univers en général. Pour l'océan, l'atmosphère et la cryosphère, ceci implique la mise en œuvre d'avions de recherche, de bateaux océanographiques, de satellites d'observation de la Terre, de stations de mesures pérennes, de bases polaires, de moyens de calcul et l'organisation de campagnes lourdes. Au-delà de la gestion coordonnée de ces moyens, l'INSU a, au cours des deux dernières décennies, fortement structuré la communauté Océan-Atmosphère en collaboration avec les autres organismes en développant une politique de programmes nationaux qui ont permis de regrouper l'ensemble des acteurs concernés (communauté scientifique, agences, ministères, etc.) pour définir conjointement des priorités et mettre en place les moyens d'action nécessaires. La nouvelle structuration du programme LEFE avec un portail unique, de nouveaux programmes comme ASSIM, sur l'assimilation de données, procèdent de cette démarche très constructive.

Tous ces éléments étaient dans le dernier rapport de conjoncture en 2006 et restent vrais. Cependant la situation a beaucoup évolué depuis et une nouvelle structuration se met en place à laquelle il faut être attentif.

Le premier élément important est la création de l'ANR qui a profondément modifié le paysage national. La communauté OA s'est évidemment investie pour obtenir les financements indispensables à sa recherche. Quelques appels d'offre étaient bien ciblés sur notre communauté avec toutefois une orientation marquée vers les impacts. Si cette démarche est souhaitable, elle est parfois trop restrictive et, heureusement, le pourcentage de programmes blancs a été revu à la hausse. L'autre biais est évidemment la durée des programmes qui n'excède pas 4 ans alors que de nombreuses recherches reposent sur la durée (observations sur le long terme, développement de modèles, organisation de campagnes lourdes). Un biais négatif peut alors être le développement de

projets court-terme sans réelle stratégie long terme dans les unités de recherche, et qui multiplient les possibilités de CDD pour les jeunes sans possibilités de stabilisation ultérieure. On peut espérer que la création très récente de l'alliance AllEnvi permette de coordonner les actions des nombreux organismes impliqués et de proposer des appels d'offre qui répondent aux objectifs prioritaires de la communauté OA, et notamment sur certains grands chantiers (Arctique, Méditerranée..)

L'autre élément très important dont nous ne vivons que les prémices est la loi LRU. Si l'autonomie des universités est souhaitable elle va parfois à l'encontre des grands programmes de notre communauté qui sont pour la plupart d'échelle nationale et internationale à cause des moyens lourds mis en jeu en termes d'acquisition des données (observations, campagnes, moyens d'analyse) ou de modélisation et de calcul. La modélisation du système terre par exemple ne peut qu'être un enjeu national.

Une réponse très positive de l'INSU a été le développement accéléré des OSUs lors des dernières années (de 17 à 24 environ). Les OSUs jouent le rôle d'un réseau national avec une très forte attache locale. En parallèle avec les OSUs le développement des SO (Services d'Observations) et des SOERE (Services d'Observations Recherche en Environnement) est un enjeu majeur pour notre communauté. Le développement relatif de la section SCOA (Surfaces Continentales Océans Atmosphère) en est une marque.

Enfin la création de l'AERES a également quelque peu modifié l'évaluation des unités. Le rôle des sections du CNRS (et parallèlement du CNU ou des comités similaires d'autres organismes) reste majeur et doit être maintenu car au-delà de l'évaluation d'une unité en propre, elles ont une vue plus globale au travers de l'évaluation de toutes les unités au cours d'un quadriennal et de tous les chercheurs tous les 2 ans. Elles peuvent donc à la fois situer chaque unité dans un contexte plus global et situer chaque chercheur au niveau local et national.

## 4.2 STRUCTURATION INTERNATIONALE

Comme indiqué précédemment, la recherche nationale est structurée en participant aux grands programmes internationaux en cours (programmes GEO, IGBP, IGAC, etc.), aux projets spatiaux coordonnés à l'échelle mondiale, aux réseaux d'observation intégrés et aux campagnes de mesures internationales. Les programmes nationaux (LEFE) ont également été structurés de façon à représenter un miroir national des grands programmes internationaux. L'IPEV joue un rôle important dans la structuration de la recherche polaire en France et a été particulièrement présent lors de la dernière Année Polaire Internationale qui a rassemblé un grand nombre d'équipes de la section 19 en particulier. Cette cohérence avec la programmation internationale (souvent établie sur une ou deux décennies) doit être maintenue et amplifiée. Ces dernières années la montée en puissance du projet EU-ESA GMES a structuré la communauté vers des applications plus opérationnelles, dans lesquelles se retrouvent les moyens d'observations sols, aéroportés et embarqués à bord de satellite. La communauté des modélisateurs est aussi très bien représentée dans ces projets (par ex. MACC, MyOcean), tant pour la modélisation globale que pour la modélisation régionale.

Dans les derniers rapports GIEC-IPCC et WMO/Ozone, on note une participation importante et en augmentation des chercheurs de la section, ce qui en retour a donné un coup d'accélérateur aux travaux de recherche relatifs au couplage des modèles atmosphère-biosphère et océans.

En ce qui concerne les missions spatiales, de nombreux chercheurs de la section sont PI de projets et l'expertise française est reconnue et recherchée (par ex. missions Mars, soleil, océan, végétation, pollution atmosphérique et climat). Un indicateur indirect du dynamisme de la communauté française pour proposer des missions spatiales ou s'investir dans l'exploitation des données est le problème du « retour géogra-

phique ESA », qui a mis un embargo sur les contributions françaises ces dernières années.

En ce qui concerne les réseaux d'observation et les campagnes de mesures, les cher-

cheurs jouent aussi un rôle moteur tant au niveau de la conception qu'à la réalisation de grands projets coordonnés au niveau international (par ex. campagnes AMMA, Polarcat ; réseaux ICOS-IAGOS, MOOSE).

## ANNEXE

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie	FR	Fédération de Recherche
AERES	Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur	GEO	Group on Earth Observations
ANR	Agence Nationale de la Recherche	GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine	GMES	Global Monitoring for Environment and Security
CDD	Contrat à Durée Déterminée	IATOS	Ingénieurs, Administratifs, Techniciens et Ouvriers de Service
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique	ICOS-IAGOS	Integrated Carbon Observation System In-Service Aircraft for a Global Observation System
CIRMAT	Comité Inter-Régional Manche-Atlantique	ICSU	International Council of Scientific Unions
CIRMED	Comité Inter-Régional Méditerranée	IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens	IGAC	International Global Atmospheric Chemistry
CNES	Centre National d'Études Spatiales	IGBP	International Geosphere-Biosphere Program
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	INEE	Institut National Environnement et Écologie
CNU	Conseil National des Universités	INRA	Institut National de Recherches Agronomiques
DT-INSU	Division Technique-INSU	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
EC	Enseignant Chercheur	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ED	École Doctorale	IPEV	Institut Paul-Émile-Victor
ESA	European Space Agency	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
ESF	European Science Foundation		
EU	European Union		

IRD	Institut de Recherche pour le Développement	PCRD	Programme Cadre (européen) de Recherche et Développement
ITA	Ingénieurs techniciens administratifs	Polarcat	Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols, and Transport
IUEM	Institut Universitaire Européen de la Mer	PU	Planètes et Univers
MACC	Monitoring Atmospheric Composition and Climate	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
MERCATOR	GIP en Charge de la mise en œuvre de l'océanographie opérationnelle	SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
MESR	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche	UMR	Unité Mixte de Recherche
MOOSE	Mediterranean Ocean Observation System on Environment	UMS	Unité Mixte de Service
LEFE	Les Enveloppes Fluides et l'Environnement	UPR	Unité Propre de Recherche
OA	Division Océan-Atmosphère de l'institut INSU	URA	Unité de Recherche Associée
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers	WCRP	World Climate Research Program
		WMO	World Meteorological Organisation

# 20

---

## **SURFACE CONTINENTALE ET INTERFACES**

*Présidente*

Pascale BAUDA

Anne ALEXANDRE

Valérie ANDRIEU-PONEL

Cécile BERNARD

Myriam BORMANS

Gudrun BORNETTE

Thierry BOUVIER

Yves BRUNET

Christopher CARCAILLET

Frédéric DELAY

Valérie DEMAREZ

Eléna GOMEZ

Gérard GRUAU

Bruno LANSON

Jean-Paul LAURENT

Sovan LEK

Nicole MAHR

Emmanuelle MONTARGÈS-PELLETIER

Gilles MORVAN

Philippe PEYLIN

Joëlle TEMPLIER

### **PRÉAMBULE**

Ce préambule a pour but d'exprimer les spécificités de la Section 20 en termes de laboratoires et de chercheurs représentés, ainsi que les besoins en personnels. La section, qui vit actuellement son second mandat, émane de la volonté conjointe des départements PU de l'INSU et SDV, puis EDD, de créer une section dédiée aux surfaces continentales et à leurs interfaces en y associant le vivant. Nous considérons cette nécessaire ouverture comme un moyen de faire évoluer les recherches dans le domaine de l'environnement. Actuellement, 1/3 des unités rattachées à la section dépendent de l'INSU et 2/3 de l'INEE. Parmi les chercheurs, 110 sont dans des unités rattachées à l'INEE et 108 dans celles dépendant de l'INSU ; 9 sont dans des unités dépendant d'autres instituts ou du ministère. Ces proportions illustrent l'activité de la section partagée entre INEE et INSU. De plus, 50 % des chercheurs de la Section 20 sont dans des unités dont le rattachement principal n'est pas en 20. La pyramide des âges des chercheurs de la section est relativement équilibrée avec 15 % des chercheurs dans la tranche 25-35 ans, 31 % dans les 35-45 ans, 29 % dans les 45-55 ans et 25 % dans les 55-65 ans, avec une proportion de DR égale à 39 %. En ce qui concerne le personnel technique, le soutien aux thématiques de recherches portées par la Section 20 rend incontournable un recrutement d'ingénieurs

visant à conserver des compétences de bases (p. ex. compétences naturalistes), asseoir de nouveaux outils (p. ex. compétences en géochimie isotopique) ou développer des systèmes d'observation et d'expérimentation performants.

## **1 – FLUX DE MATIÈRE ET D'ÉNERGIE, ALTÉRATION, ÉROSION, HYDROLOGIE**

Comme c'est le cas pour beaucoup de systèmes dynamiques, les flux, dont on rappelle qu'il s'agit de l'intégrale d'une vitesse au travers d'une surface, sont assujettis dans leur évaluation et leur modélisation à des problèmes récurrents d'échelles spatiale et temporelle. Ceci posé, la recherche dans le domaine de la surface continentale et de ses interfaces (les « SIC » dans ce qui suit) s'avère suffisamment avancée aujourd'hui pour commencer à proposer des modèles sophistiqués de la dynamique des flux de matière et d'énergie. Ces modèles incluent hydrologie, altération – érosion, nutriments et polluants, et traitent aussi bien le transport solide que les flux chimiques dissous associés. Il n'en demeure pas moins qu'une grande partie des modèles proposés reste largement perfectible, dans la mesure où la prédiction de la dynamique des flux dépend à la fois des processus considérés et du modèle utilisé. Cette dernière caractéristique rend éminemment difficile toute tentative de définir en quelques lignes des stratégies permettant d'améliorer la description et la prédiction des flux, tant ces stratégies sont liées aux types d'objets considérés et à la description conceptuelle et mathématique des mécanismes mis en œuvre.

Plutôt que d'émettre des recommandations nécessairement limitées car balayant un nombre trop restreint de cas, il nous a semblé plus judicieux de procéder à un inventaire des acquis et des verrous pouvant être levés dans le domaine.

### **1.1 DIFFICULTÉS GÉNÉRIQUES ET GRANDES QUESTIONS**

Les « interfaces » au sens des SIC sont des surfaces mettant en relation des systèmes complexes aux comportements très différents : la basse atmosphère, l'océan, les enveloppes externes de la croûte continentale, la biosphère continentale. Cet ensemble forme un continuum dans lequel de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques se déroulent sur de larges gammes d'échelles d'espace et de temps. Aux interfaces de « s'arranger » pour que la synergie de l'ensemble soit fonctionnelle ! Cette complexité des enveloppes et des interactions à prendre en compte fait que le domaine des SIC doit agréger des compétences et des protocoles particulièrement diversifiés. Par exemple, le cycle de l'eau est un facteur clé de la dynamique des flux en agissant comme agent (p. ex. altération) et comme vecteur (p. ex. transport sédimentaire). Ceci suppose des investigations à la fois très locales, par exemple la réactivité des minéraux à l'interface solide-liquide, et globale, par exemple la dynamique des pluies torrentielles de la mousson africaine, agent puis vecteur d'une érosion intense des sols. La première des grandes questions est de trouver le langage commun susceptible de faire échanger des communautés scientifiques parfois aux antipodes l'une de l'autre. Il est vraisemblable qu'à défaut de langage commun, le maintien sur le long terme de programmes nationaux de recherche fédérant les diverses communautés impliquées, et de sites ateliers ou expérimentaux partagés entre ces mêmes communautés, soit un bon palliatif.

Passée cette première difficulté de mariage d'échelles et de communautés, deux compartiments « vivants », ici dissociés, interviennent sur les processus générateurs de flux : la biosphère en général et l'anthropique. Les études antérieures se sont souvent focalisées sur les interactions biologique – biologique ou sur les effets des contraintes externes sur le biologique (dynamique des communautés, écologie fonctionnelle), laissant finalement assez peu abordée l'incidence du biologique

sur des processus et mécanismes que l'on qualifiait, faute de connaissance, de physico-chimiques. Le rôle du vivant sur son environnement abiotique reste pour beaucoup à découvrir s'il est question de décortiquer des mécanismes locaux. De la même manière, le rôle de l'anthropisation des milieux n'est pas toujours très clair dès lors que sont recherchés ses effets rétroactifs sur les flux de matière et d'énergie, ou encore sur les grands cycles biogéochimiques. Pour beaucoup, les premières difficultés sont locales : effet de catalyse ou d'inhibition de réactions physico-chimiques, de dégradation, de déformation d'un substrat, etc. La question principale devient ensuite globale : comment opérer un changement d'échelle sur les processus locaux pour produire des grandeurs assimilables à l'échelle des SIC, en occultant la spécificité individuelle ? Enfin, s'il est question d'évaluer des flux, le poids de l'hétérogénéité des milieux est souvent mal cerné, sans même parler de effets extrêmes et autres événements rares. Comment l'hétérogénéité à une échelle donnée peut-elle être prise en compte, voire quantifiée ? Un système hétérogène peut-il être considéré comme homogène au-delà d'une certaine échelle ?

Les progrès technologiques récents ont permis d'accroître le panel des outils d'observation et de mesure. La question souvent en suspens est de savoir quelle classe de problèmes les observations et mesures faites sont capables de conditionner. Fréquemment, il est procédé par investigations décorréelées alors que les variables mesurées, ou les problèmes, sont, eux, corrélés (p. ex. structure du biofilm dans un sol et vitesse moyenne de l'eau pour la fixation de l'azote). Là encore, le besoin de concertation entre communautés scientifiques semble évident afin d'aborder, sans prétendre à l'exhaustif, la complexité de questions telles que : comment les déterminants physiques, chimiques, biologiques des surfaces continentales transforment-ils les substances minérales et organiques pour « alimenter » les processus se déroulant au sein des écosystèmes ? Comment ces mêmes déterminants régulent le transfert et le devenir des contaminants, sculptent les paysages continentaux et contrôlent les échanges avec l'atmosphère et l'océan ?

## 1.2 CE QUE LA RECHERCHE FRANÇAISE SAIT FAIRE

On constate, mais il ne s'agit que d'une tendance, que la recherche française sur les SIC est plutôt en avance sur le plan de la caractérisation et des mesures, alors qu'elle est plutôt en retard sur les aspects de modélisation, en particulier sous leur forme opérationnelle et disponible pour la société civile.

Assez paradoxalement, les flux d'eau et de matière semblent finalement aujourd'hui bien mieux contraints à l'échelle globale (même entachés d'erreurs et d'incertitudes) qu'ils ne le sont par exemple à l'échelle d'un petit bassin versant. On mettra cette singularité sur le compte d'une homogénéité trouvée à grande échelle, les grandes circulations atmosphériques, océaniques et hydrographiques y étant pour beaucoup. Incidemment, on peut souligner que la connaissance à grande échelle est incitatrice de nombreux travaux cognitifs de passage, statistique ou physique, vers des échelles plus petites, afin de dégrossir les évaluations que l'on souhaiterait obtenir localement.

Le même paradoxe existe pour la mesure des flux de chaleur et de vapeur d'eau à l'interface surface continentale – atmosphère si ces mesures sont intégrées à l'échelle du paysage. C'est en particulier le cas de la scintillométrie, méthode directe d'estimation des flux de surface intégrés sur des distances allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle repose sur l'analyse des fluctuations que subit, sous l'effet des variations d'indice de réfraction le long d'un trajet, un signal électromagnétique émis à distance. Selon le domaine utilisé, optique (autour de 0,8-0,9  $\mu\text{m}$ ) ou microondes (27 GHz  $\approx 10^{-2}$  m), sont accessibles respectivement les flux de chaleur sensible ou de chaleur latente. Au plan international les développements fondamentaux en scintillométrie ont été et restent le fait d'un nombre très restreint de laboratoires (États-Unis, Pays-Bas, Allemagne). En France, les travaux de l'Inra à partir du milieu des années 90, puis la commercialisation d'instruments dans le domaine

optique, ont contribué à la diffusion de la méthode auprès de plusieurs laboratoires et à sa mise en œuvre sur le terrain (expériences Capitoul, bassins versants méditerranéens du Roujan et du Kamech, Amma, Flux-SAP, etc.), lui conférant ainsi un statut quasiment opérationnel sur certains types de surfaces. L'estimation du flux d'évaporation par scintillométrie microondes en est à un stade beaucoup moins avancé au niveau français comme au niveau international. Des travaux de validation ont débuté à l'aide d'un des rares instruments prototypes existants (construit par l'Université d'Eindhoven aux Pays-Bas). Devant la très forte motivation pour ce type de mesure un groupe est actuellement en train de se structurer en France en vue de développements méthodologiques et instrumentaux.

L'imagerie satellitaire fournit également des données relatives aux surfaces continentales, sur toute une gamme d'échelles. Aujourd'hui, elle permet notamment d'aborder avec une très haute résolution des questions comme la teneur en eau et l'occupation des sols, le suivi des états de surface. Des progrès importants ont été obtenus sur la cartographie des variables biophysiques par la mise au point de méthodes d'inversion (p. ex. réseaux de neurones) de variables biophysiques (indice foliaire, fraction absorbée de rayonnement actif pour la photosynthèse, taux de couverture du sol, etc.) à partir de données optiques, maintenant opérationnelles. La communauté dispose ainsi de cartes de variables biophysiques, à différentes échelles temporelles et spatiales (Modis, produits Geoland 2), mais qui ont encore besoin d'être validées aux échelles régionales et globales. Des développements sont en cours sur la cartographie de l'humidité du sol à partir de données radar, sur l'utilisation combinée de données radar et optique et sur la description fine de la structure verticale des « surfaces » continentales par la technique du Lidar (Light Detection and Ranging).

La communauté française est d'ailleurs particulièrement active pour contribuer à la définition de missions spatiales présentant un fort intérêt pour les surfaces continentales, à fine échelle (Venüs, Mistigri, Biomass, etc.)

comme à plus grande échelle (SMOS, SWOT, etc.). Cet intérêt est pour l'essentiel le fait des longueurs d'onde utilisées, des résolutions spatiales et des temps de revisite, et enfin des combinaisons multispectrales et multicapteurs possibles. L'accès à la haute résolution dans l'infrarouge thermique par exemple (projet Mistigri) devrait apporter une source considérable d'informations pour les SIC. Il devrait permettre, entre autres, d'accéder aux bilans radiatifs et énergétiques en contexte urbain ; le paysage urbain, véritable écosystème complexe à caractère fortement transitoire et hétérogène (flux thermiques, gazeux, bilans énergétiques, etc.), tire d'ailleurs véritablement partie de l'imagerie à très haute résolution et, de ce point de vue, contribue largement à l'amélioration des connaissances sur les effets de l'anthropisation (voir questions générales plus haut).

La technique générique du traçage a beaucoup progressé ces dernières années. On pense en particulier aux isotopes dans le traçage de l'eau, du carbone et des nutriments le long du continuum sol – plante – atmosphère, ou dans le traçage des sources d'éléments qui marquent l'origine des matériaux, leurs voies d'altération, etc. Les outils isotopiques contribuent également à l'évaluation des temps de transfert dans l'hydrosphère et l'atmosphère avec, là encore, des résultats d'autant moins critiquables qu'ils s'adressent aux grandes échelles. D'autres outils de traçage contribuent également à la caractérisation des flux et à l'origine des matériaux. On citera en particulier les outils moléculaires développés et appliqués au traçage de l'origine et du cycle de la matière organique dans les sols et dans les eaux.

À l'échelle locale, la réactivité des surfaces minérales et organiques élémentaires est un secteur qui a énormément progressé. On est aujourd'hui capable de conceptualiser puis d'écrire des modèles de réactivité intégrant une physique très sophistiquée. Beaucoup d'efforts sont faits pour passer de l'échelle nanométrique à l'échelle micrométrique, mais la hiérarchisation des mécanismes mis en jeu reste difficile, principalement à cause de l'hétérogénéité et de la complexité des systèmes. En d'autres termes, pour des problèmes

de transport réactif dans les sols, les hydro-systèmes souterrains et le réseau hydrographique, le passage de l'échelle moléculaire à celle qui est pertinente pour le transport n'est pas encore fait. Cela étant, la modélisation du transport avec couplage de réactions macroscopiques (pouvant d'ailleurs inclure en partie les effets du vivant) a bien progressé. L'exemple réactivité locale – transport réactif macroscopique est symptomatique de la nécessité évoquée plus haut de trouver un langage commun pour des communautés ayant jusque là développé leurs recherches séparément.

En termes de modélisation, l'assimilation de données et l'inversion de problèmes à grande échelle a véritablement avancé, avec dans les cas particuliers de la météorologie et climatologie, un véritable « plus » apporté par la communauté française. De fait, on est aujourd'hui capable de développer des modèles atmosphériques globaux, à dynamique fortement transitoire. On pourrait placer des bémols par endroits (p. ex. génération de la pluie, des éclairs...) mais ils concernent souvent des événements extrêmes pour lesquels l'absence de description représentative reste un frein. La modélisation atmosphérique à fine échelle (canopée, paysage, petite région) a également fortement progressé, grâce notamment aux avancées de la simulation LES (*Large-Eddy Simulation*, ou simulation des grandes échelles), dont la résolution spatiale permet de prendre en compte explicitement les hétérogénéités de surface dans divers contextes (couverts complexes, paysages fragmentés, relief, bientôt atmosphère urbaine...).

Enfin, les choses ont bien progressé dans le domaine de la description de l'hétérogénéité par des modèles synthétiques intégrables à des modèles de processus, pour des milieux comme la surface du sol (cf. télédétection à très haute résolution), les sols et les réservoirs souterrains. La modélisation à échelle fine des écoulements dans les réservoirs souterrains et les petits bassins versants a suivi la même évolution positive. Cette progression n'atteint cependant pas le degré de précision requis pour permettre l'intégration par exemple des

effets d'hétérogénéité chimique, minérale et biologique sur le couplage transport – réaction. Peut-être faut-il repenser le problème en termes d'*upscaling* (approche d'agrégation ascendante) afin de rendre compatible l'échelle de description des hétérogénéités et celle à laquelle on simule correctement le couplage.

### 1.3 LES VERROUS OUVRABLES À COURTS ET MOYENS TERMES

Le couplage atmosphérique – souterrain pour les flux d'eau et de matière est globalement réalisable à moyen terme. Les mesures indirectes relatives aux flux d'eau dans le sous-sol (hydrogéophysique *sensu lato*) avancent et se joignent aux mesures de surface et d'imagerie satellitaire pour proposer un conditionnement cohérent en termes de description d'hétérogénéité et de taille de support de mesure. Ce pré-requis à l'élaboration des modèles couplés surface – souterrain dépend cependant fortement des progrès numériques attendant à l'assimilation ou l'inversion, mais également aux capacités de décomposer des domaines spatio-temporels afin de rendre les calculs réalisables sans propager des erreurs grossières. Plusieurs initiatives sont en cours dans ce sens, autour de plates-formes de modélisation.

La dynamique des fluides et les bilans énergétiques semblent accessibles au droit des paysages urbains, ouvrant la porte à la réalisation de projections pour un meilleur aménagement de ces paysages. Le même schéma semble se dessiner pour les paysages ruraux avec notamment de nombreux travaux sur leur connectivité, l'incidence de cette connectivité sur les flux, les capacités à spatialiser des modèles locaux (p. ex., érosion, écoulement de bassin versants, etc.) et à les faire « dialoguer » entre eux. À noter que les progrès des méthodes d'assimilation, d'agrégation et de désagrégation de données devraient permettre à terme de spatialiser de manière quasi-opérationnelle, à l'échelle de ces paysages, les modèles de fonctionnement des interfaces sol – végétation – atmosphère.

Le paradoxe déjà évoqué de disposer d'informations pertinentes sur les flux de matière et d'énergie à l'échelle globale plus qu'à l'échelle d'un petit bassin versant (incluant le réseau hydrographique, le sol, la zone vadose et l'éventuelle nappe d'accompagnement) devrait trouver une solution, et ce pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des progrès réalisés en imagerie à haute résolution et en approches numériques. Ce sont pour l'essentiel des problèmes de spatialisation de l'information locale et de gestion de temps caractéristiques contrastés entre processus qui nuisent à une bonne intégration des flux de matière et d'énergie à l'échelle du petit bassin versant. Il reste cependant à développer un réseau national d'observations, ou des observatoires régionaux, orientés sur la dynamique et la physique des systèmes. Les observatoires régionaux apparaissent comme une nécessité pour évaluer les performances des modèles de fonctionnement alimentés par les données de télédétection.

Enfin, malgré les difficultés de « transfert » entre communautés scientifiques, l'*upscaling* de la réactivité à l'échelle nanométrique de surfaces minérales et organiques et le système réactif macroscopique (couplé au transport) est accessible. Un chantier prometteur semble être celui des interactions minéral – microfaune – bol racinaire – sol. On peut penser que le couplage entre des modèles thermodynamiques et une dynamique d'écoulement est susceptible de faire le pont entre les échelles.

## **2 – BIODIVERSITÉ, ÉCOLOGIE DES COMMUNAUTÉS, FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES**

Dans le cadre de la Section 20, cette thématique s'attache à identifier et quantifier les mécanismes et les processus reliant la structure

et le fonctionnement des écosystèmes. Plus particulièrement elle vise à déterminer (i) comment le contexte environnemental *sensu lato* (variabilité spatiale et temporelle de l'habitat physique et chimique) modifie la structure et la dynamique des populations, guildes ou communautés, ainsi que les interactions entre organismes, et (ii) comment, en retour, ces communautés, caractérisées par leur diversité spécifique ou fonctionnelle, structurent et modifient l'habitat ainsi que les transferts de matière et d'énergie. Les fonctions cibles sont donc celles agissant directement ou indirectement sur l'habitat et les flux des éléments.

### **2.1 FORCES DE LA RECHERCHE FRANÇAISE**

Les forces de la recherche française dans ce champ sont structurées en équipes abordant soit la réponse des communautés vivantes aux contraintes de l'habitat (en termes de richesse spécifique et de traits biologiques), soit l'action des organismes et leurs interactions, tant biotiques qu'avec le milieu, sur le fonctionnement et les propriétés des écosystèmes. Plusieurs laboratoires étudient spécifiquement la relation entre traits de réponse et traits d'actions, en se focalisant sur les fonctions liées aux cycles de l'azote et du carbone, à la dégradation de la matière organique ou à l'épuration biologique. Dans ce contexte, les atouts séduisants des organismes microscopiques pour valider certains concepts d'écologie théorique ont poussé les écologues théoriciens et expérimentaux, notamment les microbiologistes, à se retrouver sur un terrain pluridisciplinaire. Cette interface entre théorie et écologie des communautés, des microbes et des organismes dits supérieurs est fructueuse. Aujourd'hui, il est nécessaire de poursuivre cette démarche. Cependant, la simplification des dessins expérimentaux, nécessaire à une déconvolution des processus, se heurte trop souvent à la difficulté d'extrapoler à la réalité *in situ*. Ceci est en partie dû au fait qu'une relation écologique chez un modèle biologique ne peut être que

partielle chez un autre modèle. D'autre part, deux modèles biologiques différents peuvent s'exprimer sur des parties distinctes d'un même gradient écologique. Enfin, les divers modèles biologiques (plantes, animaux, insectes, unicellulaires) opèrent à des échelles de temps et d'espace différentes, ajoutant une complexité à l'extrapolation des résultats à l'écosystème. Ainsi, des interprétations générales peuvent par exemple conduire à de fausses conclusions sur le fonctionnement des écosystèmes. Un des enjeux futurs sera de confronter les réponses écologiques potentielles détectées au laboratoire à celles réalisées *in situ*.

Plusieurs équipes se focalisent sur l'impact de la structure de l'habitat (p. ex. connectivité, fragmentation) sur la biodiversité, et les conséquences des altérations de cette structure (et des tentatives de restauration) sur les fonctions assurées par les paysages au regard essentiellement de la conservation des populations et des communautés, mais parfois également de certains processus (épuration, puits de carbone p. ex.). Une réflexion dynamique, reposant sur la modélisation couplée à des expérimentations, porte également sur les problématiques concernant la résistance des systèmes écologiques (structure, fonctions, interactions) aux altérations de l'environnement, en tentant d'établir le rôle de la diversité spécifique et fonctionnelle et de la complexité des réseaux trophiques. Le développement rapide de la génomique environnementale va également permettre d'élucider les liens entre biodiversité et fonctions dans des contextes d'environnements complexes.

Les problématiques relatives au changement global sur la biodiversité (en incluant les phénomènes d'invasion) et les fonctions associées sont particulièrement étudiées. Enfin, de nombreuses recherches se construisent dans le champ de l'écologie de la restauration, en mettant en place des expérimentations en vraie grandeur destinées à tester des hypothèses émises sur le fonctionnement et la résilience des écosystèmes. Ce champ en émergence est encore dans une phase d'élaboration d'un cadre conceptuel, mais il devrait progresser rapidement en tirant partie de la demande

sociétale croissante de restauration des écosystèmes altérés par les actions anthropiques et les fonctions associées.

Enfin, des programmes de recherche voient le jour avec l'objectif d'appréhender conjointement les services écosystémiques et les fonctions écologiques dans une même démarche transversale, et intégrant la perception sociétale de ces fonctions. Même si la traduction de ces programmes en réflexions interdisciplinaires est là aussi en gestation, les démarches mises en place par le CNRS et visant à soutenir les projets d'ingénierie écologique sont extrêmement positives. Elles encouragent en effet la mise en place d'outils de restauration et de gestion des écosystèmes reposant sur les résultats les plus récents de la recherche. Ceci devrait à terme permettre (i) le développement de modèles et de théories relatives à l'ingénierie écologique et à l'écologie de la restauration, modèles encore très rares aujourd'hui, et (ii) une meilleure articulation de ces modèles avec les théories et les modèles relatifs au fonctionnement des écosystèmes.

## 2.2 FAIBLESSES

Les démarches de construction des typologies de fonctionnement des écosystèmes, reposant notamment sur la complexité et la diversité de leurs fonctions, restent encore balbutiantes. De nombreuses approches s'appuient en effet sur des démarches expérimentales – souvent coûteuses – et des écosystèmes pilotes, et sont destinées à décrypter des mécanismes plus qu'à fournir des modèles exhaustifs. De tels modèles sont pourtant nécessaires pour (i) tester, valider ou invalider les modèles construits en écologie fonctionnelle, et (ii) aider les gestionnaires de l'environnement à gérer de manière raisonnée les écosystèmes ou à les restaurer de manière performante.

Les études concernant le changement global intègrent encore peu le passé. C'est le cas notamment des études rétrospectives du

fonctionnement des écosystèmes, même si se dessinent progressivement des communautés scientifiques qui interagissent à des échelles de temps différentes autour de ces questions. Dans ce contexte, les réflexions visant à concilier les démarches et les concepts de l'écologie fonctionnelle avec ceux de l'écologie évolutive sont essentielles, en particulier (i) pour appréhender la vulnérabilité aux altérations environnementales des espèces et des communautés constituant les systèmes écologiques, et (ii) pour déterminer le potentiel d'adaptation de ces mêmes communautés et donc la conservation des fonctions qui leur sont associées.

Enfin, les approches interdisciplinaires, même si elles constituent le cœur de la section, sont encore en construction et devraient se développer dans l'avenir, au fur et à mesure que seront résolues les difficultés liées aux changements d'échelle et aux différences d'angle de perception entre champs disciplinaires. On peut citer à titre d'exemple les difficultés à transposer *in situ* les recherches en écotoxicologie réalisées au laboratoire. La raison tient à l'exposition des écosystèmes, dans les situations naturelles, à des mélanges complexes de polluants, combinés à des altérations physiques des habitats (voir chapitre 3).

## 2.3 BESOINS

Les expériences à grande échelle et multi-compartiments sont de plus en plus nécessaires, et requièrent une meilleure articulation entre les opérations de génie écologique, de restauration écologique, et les questionnements des chercheurs de nos domaines. De nombreuses opérations sont ainsi conduites sans le cadre scientifique rigoureux qui permettrait d'en valoriser pleinement les résultats, en particulier en termes d'élucidation du fonctionnement des écosystèmes face à des altérations de grande ampleur. Outre la rigueur du suivi scientifique, il manque à la plupart de ces opérations une analyse interdisciplinaire de l'objet écologique. Une telle démarche devrait

reposer sur la construction d'une réflexion conjointe entre scientifiques et gestionnaires, intégrant la mise en place d'un phasage et la construction d'équipes interdisciplinaires autour de l'analyse de ces opérations.

## 3 – ÉCOTOXICOLOGIE, DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS ET DES CONTAMINANTS, PHYSICOCHIMIE DES INTERFACES, BIOGÉOCHIMIE

Le devenir des éléments et des contaminants est, pour l'essentiel, contrôlé par leurs interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants des formations continentales superficielles. Sous le terme de « contaminants » sont inclus les composés chimiques d'origine anthropique ou naturelle, mais également les agents biologiques, pathogènes ou produisant des toxines, dont la dynamique est liée aux processus croissants d'anthropisation. Dans une optique de développement durable, la compréhension du devenir des éléments « nutritifs » doit également être considérée.

Dans le contexte écodynamique, le devenir des éléments et des contaminants recouvre la distribution aussi bien spatiale que temporelle et les modifications de leur forme chimique et structurale (spéciation). L'écodynamique des contaminants est une question en partie couverte par le chapitre de ce rapport dédié aux flux ; cet aspect ne sera donc pas repris ici.

Le devenir des contaminants conditionne leur disponibilité, leurs effets sur le vivant ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. La compréhension des mécanismes contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants est donc un enjeu de la plus grande importance dans le contexte des ser-

vices écologiques (préservation, altération, remédiation). Cet enjeu sous-entend également la capacité à décrire les processus impliqués et leurs facteurs de contrôle par une approche de modélisation.

La compréhension de ces processus nécessite d'en appréhender les mécanismes à l'échelle la plus élémentaire. Ceci concerne aussi bien la physicochimie des interfaces que la biogéochimie, et met en jeu un ensemble d'interactions avec et entre les systèmes biologiques. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous les niveaux d'organisation biologiques jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère. Une telle compréhension est nécessaire pour fonder la modélisation des systèmes complexes sur des bases mécanistes afin de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles.

En tant qu'interface essentielle entre les processus biologiques, chimiques et physiques, la fine pellicule soutenant le développement biologique à la surface de la Terre définit le cadre spatial de ces recherches. Dans cette zone, fréquemment dénommée « zone critique », l'homme est à prendre en compte, non seulement en tant que cible directe de contaminants, comme l'étudie la toxicologie, mais également en tant que maillon terminal des réseaux trophiques et organisme vivant, acteur et perturbateur.

## 4 – LES LIMITES DES APPROCHES ACTUELLES ET LES VEROUS À LEVER

Une des difficultés rencontrée dans l'étude de la zone critique réside dans son hétérogénéité et sa complexité intrinsèque à toutes les échelles, y compris les plus fines. Cette complexité s'ajoute au caractère dynamique des systèmes considérés. Ces deux spécificités limitent non seulement notre capacité à les reproduire expérimentalement mais égale-

ment notre capacité à les modéliser. Dans cette perspective, il apparaît donc particulièrement pertinent de :

- mieux utiliser les observations faites, y compris aux échelles les plus fines, pour les intégrer dans la dynamique d'évolution des systèmes ;
- effectuer des aller-retours entre les observations *in situ* et les systèmes analogues simplifiés pour mieux orienter les expérimentations en laboratoire ;
- hiérarchiser les processus impliqués sur la base des lois physiques qui les contrôlent pour fonder l'approche modélisatrice de la façon la plus pertinente possible ;
- intégrer l'organisation biologique et en particulier comprendre et modéliser les mécanismes moléculaires d'interaction des contaminants avec les molécules du vivant ;
- gérer les changements d'échelles spatiales et en particulier améliorer la description à l'échelle du mm ou cm, qui est celle de l'homogénéisation ;
- prendre en compte les aspects dynamiques ainsi que les rythmes biologiques et leur incidence sur la dynamique de spéciation des éléments.

Le plus souvent, les composants de la zone critique sont en effet considérés comme immuables alors que les changements d'usage et les modifications des flux élémentaires, en particulier des nutriments et des contaminants, vont influencer sur les diversités organo-minérales et biologiques. Dans cette perspective, l'étude d'analogues naturels (anomalie géochimique pour les éléments trace p. ex.) pourrait permettre de mieux comprendre, sinon les processus d'évolution, du moins le devenir ultime des éléments et des contaminants dans un système naturel complexe, et donc de mieux cibler les systèmes et les processus pertinents. L'utilisation de traceurs comme les isotopes stables permet également de mieux prendre en compte la dynamique de ces systèmes.

La multiplicité des interactions, caractéristique de la zone critique, est d'autant plus difficile à étudier dans le cas fréquent des pollutions

diffuses où des sources multiples de contaminants divers s'ajoutent au fond géochimique. Dans ce cas, les interactions entre contaminants doivent être prises en compte. Pour mieux les expliciter, les isotopes stables et leur fractionnement peuvent s'avérer utiles en tant que traceurs des éléments et des réactions; leur utilisation est à développer. Il est aussi nécessaire d'améliorer notre connaissance de la structure et de la composition chimique des matières organiques naturelles et en particulier celle des fractions macromoléculaires, les interactions avec les molécules simples étant mieux documentées. Enfin, la compréhension des interactions avec le vivant comme composant actif de ces milieux reste insuffisante.

Une autre difficulté provient de ce que les études menées sur cette zone critique l'ont souvent été de manière disciplinaire ou en découplant les différents compartiments. Un des objectifs semble donc de réunir sur un même site, ou autour d'un objet commun, des compétences diverses permettant la pluridisciplinarité qu'impose la complexité des systèmes étudiés. Il apparaît par exemple nécessaire de renforcer les connaissances relatives aux couplages entre les processus physiques, chimiques et biologiques agissant au sein d'un même compartiment et à leurs conséquences en termes de flux et de bilans. Le couplage entre cycles hydrologiques et géochimiques apparaît ainsi comme essentiel. Il est nécessaire d'intégrer la dynamique du vecteur de transfert des éléments et des contaminants, souvent considérés comme immobiles, pour modéliser leur devenir.

Enfin, le passage des observations aux très petites échelles (nano ou micro, moléculaire ou individus pour le vivant) vers des échelles intermédiaires (mm ou cm, populations ou communautés pour le vivant) ou plus vastes (bassins versants, écosystèmes) reste une question ouverte.

## 4.1 LES FORCES EXISTANTES

Dans le contexte international la France accuse globalement un retard dans l'étude de

la zone critique. Dans ce domaine les États-Unis sont clairement en tête, suivis par les Canadiens et, en Europe, la Grande-Bretagne et les Pays-Bas. Le retard français est principalement dû à :

- une gestion disciplinaire de la recherche (au niveau des laboratoires, des départements, parfois des universités);

- la multiplicité des établissements impliqués qui renforce le cloisonnement;

- le cloisonnement entre les formations ingénieur et universitaire, qui pourrait cependant s'atténuer dans le contexte d'évolution des campus.

Pour ces raisons nos forces sont donc essentiellement disciplinaires, alors que nos faiblesses portent surtout sur la difficulté à faire converger ces compétences disciplinaires sur des problématiques environnementales.

Au cours de la dernière décennie, une large palette d'instruments a été développée. On peut entre autres citer les outils qui permettent désormais d'obtenir avec une résolution spatiale sub-micrométrique les caractérisations physiques et chimiques anciennement limitées aux seuls échantillons macroscopiques. De telles techniques sont efficaces pour comprendre les interactions solide-solution sur des systèmes analogues et contrôlés. Elles permettent également de faire un bilan statique de la distribution et de la spéciation des contaminants lourds (métaux, métalloïdes) dans un milieu hétérogène. À ces techniques d'imagerie chimique s'ajoute le développement de méthodes électrochimiques, spécifiquement dédiées à une meilleure perception de la dynamique de spéciation des éléments métalliques aux interphases colloïdales. L'étude des contaminants organiques et autres xénobiotiques, reposant à l'heure actuelle sur les techniques de séparation (chromatographie), reste fortement dépendante des développements méthodologiques et notamment de la mise en œuvre de nouveaux systèmes de détection. Le suivi des contaminants organiques est également tributaire de la compréhension des séries de réactions de dégradation et d'altération.

L'écotoxicologie, pour des raisons historiques liées à l'émergence de cette discipline, évolue vers une plus grande interdisciplinarité et se structure au niveau national. Cette ouverture est à poursuivre et à encourager afin de résoudre la question de l'*upscaling* des données aux différents niveaux d'organisation du vivant.

Des forces existent en France en écologie fonctionnelle et en écologie théorique qui devraient s'appliquer au cours des prochaines années à l'écotoxicologie. Nous savons caractériser le fonctionnement des écosystèmes dans des conditions données où les principaux processus fonctionnels peuvent être quantifiés, parfois modélisés, mais sans prendre en compte la pression anthropique en tant que forçage. Dans ces disciplines il faut également mieux intégrer les flux.

Des plates-formes de génomique et post-génomique performantes existent mais les outils sont encore en évolution et les approches restent coûteuses. Des supports financiers devraient être négociés pour développer ces approches qui concourent à une meilleure description de la biodiversité et de ses altérations, ainsi qu'une meilleure évaluation de l'impact des contaminants sur l'expression des gènes, des protéines et des métabolites ayant des conséquences sur les niveaux supérieurs d'organisation du vivant. La masse de données nouvelles générée par ces approches devrait permettre de faire évoluer nos questionnements, voire engendrer de nouvelles interrogations.

## **5 – IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX, PALÉOÉCOLOGIE, PALÉOENVIRONNEMENTS CONTINENTaux ET CÔTIERS**

Une connaissance approfondie des processus environnementaux modifiant le

fonctionnement des écosystèmes terrestres, lagunaires et côtiers est un pré-requis essentiel pour améliorer les prédictions environnementales à court et long terme et *in fine* évaluer leurs impacts potentiels sur les sociétés. Cette connaissance passe par :

- la compréhension des mécanismes interagissant entre les principales composantes des écosystèmes (substrat, fluides, végétation, faune) sous l'effet des changements naturels et anthropiques (y compris climatiques), la quantification de ces changements, la connaissance de leur niveau d'organisation et la capacité à les modéliser ;

- l'élaboration d'indicateurs synthétiques et de modèles intégrés (couplant les différentes composantes) robustes permettant de comprendre et prédire la dynamique des écosystèmes continentaux et côtiers.

La France affiche un fort potentiel sur certains points cruciaux tels que :

- l'étude de structure et fonctions des communautés et du fonctionnement des écosystèmes et de leurs réponses aux forçages environnementaux biotiques et abiotiques ;

- l'impact des changements globaux sur la dynamique des écosystèmes côtiers ;

- le développement d'indicateurs quantitatifs des changements au sein des écosystèmes et l'acquisition des données que ces indicateurs agrègent ;

- la modélisation « disciplinaire » des composantes de ces écosystèmes (p. ex. fonctionnement des plantes, hydrologie...);

- la modélisation climatique régionalisée.

Des approches complémentaires, dont le développement est international, méritent en outre d'être encouragées :

- l'accroissement de la connaissance des interactions présentes et passées entre les différentes composantes des écosystèmes continentaux, leur quantification et leur modélisation. Par exemple, il serait judicieux de développer la quantification de l'impact des changements globaux et l'incidence des varia-

bles biotiques et abiotiques régionales ou locales sur les écosystèmes. À l'échelle régionale, l'intégration de différentes approches disciplinaires autour d'observatoires spatiaux régionaux ou de bassins versants instrumentés devrait favoriser l'étude de ces interactions ;

- le développement d'indicateurs synthétiques et quantitatifs des changements continentsaux aux échelles planétaires mais aussi locales et l'élaboration de bases de données inter-opérationnelles ;

- le renforcement de l'acquisition de données biologiques et géochimiques par l'augmentation de la résolution temporelle de séquences paléoenvironnementales clés, mais aussi l'étude de zones géographiques pour lesquelles on dispose de peu de données (p. ex. zone inter-tropicale, Moyen-Orient, hautes latitudes) ;

- l'amélioration des outils (dont la datation radiocarbone) permettant des comparaisons chronologiques robustes entre les enregistrements paléo-environnementaux ;

- la caractérisation du rôle des extrêmes climatiques et de leur fréquence dans la modification des écosystèmes terrestres ; seraient alors mis en avant l'existence de seuils dans la réactivité des systèmes, les effets d'hystérésis dans leur capacité à revenir à un état standard, etc. ;

- l'amélioration de la représentation de la biodiversité et de ses fonctionnalités dans les modèles utilisés pour comprendre et prédire les changements globaux (p. ex. DGVMs, ou *Dynamic Global Vegetation Models*) ;

- le développement dans la modélisation des approches ascendantes d'agrégation (*ups-caling*, combinant connaissances locales et informations spatiales) et descendantes de désagrégation (*downscaling*) ainsi que l'estimation des incertitudes associées aux processus et à leur propagation.

## 6 – LES OUTILS NÉCESSAIRES

### 6.1 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET PLATES-FORMES ANALYTIQUES

Les dispositifs expérimentaux de type micro- et mésocosmes sont indispensables pour élucider la plupart des verrous scientifiques évoqués. L'échelle du mésocosme est très importante car elle permet de créer un niveau de complexité intermédiaire entre le terrain et le laboratoire où toutes les conditions sont contrôlées. Ce niveau intermédiaire est indispensable pour tester des hypothèses émises à partir de données obtenues dans des conditions soit plus complexes soit entièrement contrôlées.

Dans ce contexte, ni le morcellement des plates-formes expérimentales de petite taille ni leur concentration autour de plates-formes de très grande taille ne sont souhaitables. En effet, la mise en place d'expérimentations sur des organismes vivants n'est pas toujours transposable d'une aire géographique à l'autre. Par conséquent, ces outils doivent concilier des contraintes variées afin de répondre de manière opérationnelle, et pour un coût raisonnable, aux questionnements relevant de catégories d'organismes et d'habitats contrastés.

Les pistes offertes par les écotrons sont également souhaitables pour aborder la problématique des flux sur les SIC. Ceci devrait rapidement permettre de transposer des expérimentations intégrant le vivant à des mises en conditions de forçage contrôlées mais comparables au milieu naturel. Compte tenu de leur coût, les écotrons en cours de développement sont *a priori* suffisants. Des modalités d'accès sur projet doivent être établies, sur le modèle de ce qui se pratique sur d'autres grands instruments.

Les synchrotrons font partie des outils performants, et en plein développement, pour l'imagerie aux petites échelles et la déter-

mination des environnements atomiques de contaminants inorganiques ou d'éléments. Les efforts actuels pour imager les contaminants les plus pertinents et pour faciliter ou améliorer la description d'objets naturels hétérogènes sont à soutenir.

Par ailleurs, une modernisation des protocoles et équipements permettant la datation  $^{14}\text{C}$  en France est aujourd'hui nécessaire afin de répondre à l'évolution des besoins de la communauté nationale et au maintien de sa compétitivité, notamment d'un point de vue qualitatif (taille des échantillons, datation sur composés spécifiques).

Enfin, il est souhaitable de faciliter l'accès aux plates-formes de génomique et post-génomique dédiées à nos questions, en le soutenant par des actions programmatiques.

## 6.2 SOUTIEN À L'INTERDISCIPLINARITÉ

Il est important pour les thèmes de la section d'agréger des compétences disciplinaires multiples autour de sites ou d'objets spécifiques. Cette agrégation de compétences nécessite des sites ou objets d'étude communs à plusieurs disciplines, ainsi que des actions programmatiques interdisciplinaires récurrentes. Les thématiques relevant de la Section 20 ne sont pas exclusives au CNRS mais largement partagées avec les chercheurs des établissements (IRD, Inra, Cirad, Cemagref, Ifremer, CEA, Cnes, Universités, etc.), qui travaillent sur des chantiers et programmes communs, ou au sein d'unités communes. Cette agrégation doit donc bien entendu impliquer l'ensemble des acteurs et devrait être facilitée par la mise en place des alliances. Pour un réel succès il faut combiner des compétences disciplinaires fortes et la capacité à comprendre les différents aspects interdisciplinaires d'une question. Ceci nécessite un effort d'ouverture coûteux en temps et trop souvent négligé, voire exclu, en raison de la pression de production exercée sur les chercheurs et les doc-

torants. Ces efforts, imposés par la construction d'un dialogue interdisciplinaire autour d'objets communs, mais souvent vus à des échelles ou sous des angles très différents, portent progressivement leurs fruits.

L'émergence de formations interdisciplinaires ou au moins bidisciplinaires adaptées aux problématiques environnementales devrait aider dans ce sens. Actuellement, les formations interdisciplinaires (regroupant par exemple sciences de la terre, écologie, biologie, chimie) sont en nombre très faible avec pour conséquence un vivier restreint de candidats au doctorat, post-doctorat, voire aux concours de chercheurs, formés pour appréhender les écosystèmes et les hydrosystèmes dans leur ensemble. Dans cette perspective, les outils tels que les DIPEE mis en place par l'INEE s'avèrent essentiels.

Les sites des laboratoires devraient être inventoriés dans une base de données, telle que celle en cours dans le cadre du réseau des bassins versants. Les sites des fédérations, des OSU, de même que les ZA et les SOERE sont également utiles pour fédérer les actions et doivent être pérennisés au moins à moyen terme.

En ce qui concerne les actions programmatiques pluridisciplinaires, EC2CO est devenu un support efficace et indispensable de la recherche en environnement. Il est nécessaire de pérenniser ce type de programme pluridisciplinaire, mais également de lui donner les moyens d'être un peu plus qu'un support incitatif, notamment pour quelques projets cognitifs « amonts » qui s'accommodent assez mal d'une contractualisation de courte échéance. Les GDR (Groupements de Recherche) sont également des outils structurants, autour de thématiques plutôt que de sites, permettant d'agréger les compétences nécessaires pour répondre à des questionnements. Il est dommage que le financement de ces structures ait été revu à la baisse ces dernières années. Il ne serait d'ailleurs pas inintéressant de redévelopper des structures fédératrices de type GDR autour d'un ou plusieurs SOERE avec la charge de valoriser scientifiquement les données acquises (exercices communs de modélisa-

tion, inter-comparaison d'approches métrologiques, confrontations d'approches théoriques, etc.)

### 6.3 BESOINS EN PERSONNELS

Les unités font face à un manque croissant de soutien technique dans le domaine de

l'acquisition des données et de la modélisation. La création de plates-formes techniques (p. ex. bio-indicateurs et microscopie; traçage géochimique; expérimentations en conditions contrôlées; programmation) au sein des unités permettrait de mieux valoriser les compétences des personnels techniques et d'optimiser les interactions entre ces derniers, les étudiants et les chercheurs. Elle ne pourra cependant pallier le manque évident de ces personnels.

## ANNEXE

			adsabs.harvard.edu/abs/2009SPIE.7453E...6T
Amma	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine <a href="http://www.amma-international.org">http://www.amma-international.org</a>	Modis	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/">http://modis.gsfc.nasa.gov/</a>
Biomass	Biomass monitoring mission for Carbon Assessment <a href="http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/indexbiomass.html">http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/indexbiomass.html</a>	OSU	Observatoires des sciences de l'Univers <a href="http://www.insu.cnrs.fr/co/osu/osu-observatoires-des-sciences-de-l-univers">http://www.insu.cnrs.fr/co/osu/osu-observatoires-des-sciences-de-l-univers</a>
Capitoul	Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer <a href="http://medias3.mediasfrance.org/capitoul/index.jsp">http://medias3.mediasfrance.org/capitoul/index.jsp</a>	SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity <a href="http://smos.cnes.fr/SMOS/Fr/">http://smos.cnes.fr/SMOS/Fr/</a>
DIPEE	DIspositifs de Partenariat en Écologie et Environnement	SOERE	Systèmes d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement
EC2CO	Écosphère Continentale et Côtière <a href="http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/ec2co/ec2co.htm">http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/ec2co/ec2co.htm</a>	SWOT	Surface Water Ocean Topography <a href="http://bprc.osu.edu/water/">http://bprc.osu.edu/water/</a>
Flux-SAP	Secteur Atelier Pluri-disciplinaire <a href="http://www.irstv.cnrs.fr/article.php3?id_article=113">http://www.irstv.cnrs.fr/article.php3?id_article=113</a>	Venµs	Vegetation and Environnement monitoring on a New Micro-Satellite <a href="http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/mission1.htm">http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/mission1.htm</a>
Mistigri	MicroSatellite for Thermal Infrared GRound surface Imaging <a href="http://">http://</a>	ZA	Zone Atelier

# 21

---

## **BASES MOLÉCULAIRES ET STRUCTURALES DES FONCTIONS DU VIVANT**

*Président*

Philippe WALTER

*Rapport non transmis par la section 21.*

*Membres de la section*

Philippe BENAS

Thierry BLASCO

Sandrine BOSCHI-MULLER

Dominique BURNOUF

Patrice GOUET

Stéphane GRIMALDI

Daniel LEVY

Jean-Claude MICHALSKI

Michaël NILGES

Chantal PICHON

Véronique PILLER-MICHEL

Pierre PLATEAU

Véronique RECEVEUR-BRÉCHOT

Pascale ROMBY

Françoise SCHOENTGEN

Laurence SERRE

Marie-Christine SLOMIANNY

Patrick TAUC

Vincent VILLERET



# 22

## ORGANISATION, EXPRESSION ET ÉVOLUTION DES GÉNOMES

*Président*

Thierry GRANGE

*Membres de la section*

Serge BOITEUX

Nathalie BONNEAUD

Florence CAMMAS

Agamemnon CARPOUSIS

Laurent DURET

Gwennola ERMEL

Alain EYCHENE

Cécile FAIRHEAD

Clotilde GIMOND

Olivier JEAN-JEAN

Christèle MAISON

Bénédicte MICHEL

Kim Heng NG-BONAVENTURE

Béatrice PY

Lluís QUINTANA-MURCI

Stéphane RONSSERAY

Catherine ROUSSEAU

Jean-Pierre ROUSSET

René TOCI

Lucas WALTZER

### INTRODUCTION

Le génome est au cœur du fonctionnement des organismes vivants, assurant la pérennité et la propagation des propriétés des cellules et des organismes. Il est l'objet d'étude au centre des missions de la section 22 intitulée « Organisation, expression et évolution des génomes ». La section couvre les domaines disciplinaires étudiant la structure des génomes et leurs évolutions; les mécanismes contrôlant leur intégrité, leur propagation et leur expression; l'organisation chromatinienne, chromosomique et nucléaire des génomes et les conséquences épigénétiques de ces organisations; les fonctions contrôlant et contrôlées par les génomes, et les liens entre génotype et phénotype. Les chercheurs rattachés à la section 22 étudient généralement ces aspects en utilisant alternativement ou en combinaison des approches moléculaires, génétiques et génomiques, utilisent souvent des systèmes modèles unicellulaires ou multicellulaires mais aussi des approches *in silico*, et peuvent s'intéresser aussi bien à des approches d'étude des molécules uniques que visant à la compréhension de l'intégration fonctionnelle des événements multimoléculaires. L'expansion des séquençages des génomes et l'évolution très rapide des performances des méthodes de séquen-

çage à très haut débit influencent fortement les domaines disciplinaires couverts par la section et élargissent très significativement son assise interdisciplinaire. La bioinformatique génomique et la modélisation arrivent progressivement au cœur de ces disciplines et l'interdisciplinarité associant les approches formelles et expérimentales devient un enjeu stratégique essentiel pour la vitalité des domaines scientifiques relevant de la section 22. La section 22 est consciente des recouvrements avec d'autres sections s'intéressant à l'étude moléculaire des régulations présidant aux grandes fonctions du vivant, en particulier les sections 21 et 23 à 26, et ainsi qu'aux aspects touchant plus particulièrement à l'évolution des génomes et à l'intégration des données génomiques au niveau populationnel qui la rapproche de la section 29 rattachée à l'INEE.

La section s'efforce de gérer ces recouvrements de manière à ce que la cohérence des champs disciplinaires puisse être assurée d'une façon prospective et réactive afin que l'organisation en section et en institut du CNRS permette et favorise les évolutions scientifiques aux frontières des structures.

## LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

Dans les domaines d'intervention de la section 22, l'analyse des données issues du séquençage des génomes joue un rôle important. Auparavant, le séquençage des génomes dépendait exclusivement de grosses infrastructures et la France n'a pas joué un rôle prééminent dans ce domaine compte tenu de la difficulté rencontrée dans la mise en place d'un nombre suffisant d'infrastructures efficaces, en partie faute de moyens. Les techniques de séquençage évoluent vers des machines à très haut débit qui peuvent séquencer plusieurs centaines de Gigabases par semaine à des coûts financiers beaucoup moins élevés, en utilisant peu de matériel initial et en s'affranchissant des étapes de construction et de caractérisation d'une banque génomique.

Ceci offre des opportunités d'utilisation du séquençage pour de très nombreuses applications qui influencent et influenceront profondément l'évolution des sciences des génomes et de la vie en général. Cette évolution n'a pas été suffisamment anticipée par les structures déjà existantes et un retard très important dans le domaine des grands centres de génomique a déjà été pris lorsque l'on regarde les évolutions déjà réalisées dans d'autres pays, même dans des pays que l'on n'a pas encore pris l'habitude de considérer au plus haut niveau scientifique comme la Chine.

D'autre part, les machines de nouvelle génération offrent la possibilité de décentraliser la production des données de séquences et de la rapprocher directement des laboratoires d'expérimentation biologique, et donc d'intégrer plus efficacement ces données dans le processus global de production de connaissances.

La décentralisation du séquençage représente aussi un enjeu stratégique de formation des scientifiques à la nouvelle biologie interdisciplinaire qui est en train d'émerger et qui allie analyse bioinformatique et formelle à la biologie expérimentale. Un accompagnement significatif en moyens humains et financiers de cette décentralisation nous paraît stratégique pour tirer le meilleur parti de la qualité actuelle du tissu national de laboratoires de biologie expérimentale d'analyse des génomes et permettre ainsi à la France de tenir encore son rang scientifique dans ce domaine stratégique pour la biologie fondamentale, comme pour les biotechnologies ou la biologie médicale.

## ORGANISATION ET EXPRESSION DES GÉNOMES

L'analyse mécanistique et fonctionnelle de l'organisation chromatiniennne, chromosomique et nucléaire des génomes et de leur expression a progressé très significativement

ces dernières années et des avancées importantes ont été réalisées grâce d'une part à la caractérisation systématique d'un grand nombre d'enzymes affectant l'organisation chromatinienne, les modifications de l'ADN (méthylation) et l'expression des gènes aussi bien au niveau transcriptionnel que post-transcriptionnel, d'autre part à l'analyse globale des produits de l'activité de ces enzymes : modifications de la chromatine ou de l'ADN, ou ARNs ou protéines exprimées. Les progrès dans la caractérisation systématique des enzymes résultent essentiellement du grand nombre d'équipes qui combinent des approches biochimiques et génétiques.

Ces approches génétiques ont pu être réalisées beaucoup plus systématiquement dans de nombreux systèmes modèles, en particulier cellulaires, grâce à la découverte des ARN interférents. Les progrès et la généralisation des techniques de spectrométrie de masse ont aussi contribué pour beaucoup à la caractérisation quasi exhaustive des partenaires protéiques des multiples complexes enzymatiques. Il y a encore certainement un grand nombre d'activités qui restent à découvrir et la pérennisation de ces directions de recherche est clairement justifiée. Le tissu des laboratoires français qui s'intéressent à ces aspects est de qualité et de nombreuses équipes ont contribué significativement aux progrès du domaine. Il paraît important de leur permettre de poursuivre à ce niveau, de se régénérer, et d'intégrer les analyses globales dans leurs problématiques. Les analyses globales de modification de la chromatine, de méthylation de l'ADN, et des populations d'ARNs exprimés ou associés à des compartiments ou des complexes protéiques se sont fortement développées ces dernières années, tout d'abord grâce à l'utilisation des puces à ADN (transcriptome, CHIP-chip, MeDip...). Ces approches ont récemment fait un saut quantitatif et qualitatif très important suite à l'application des techniques de séquençage à très haut débit (RNA-seq, ChIP-seq, MethylC-Seq, 5C...) qui permettent d'augmenter considérablement la précision et l'exhaustivité des résultats. Cette évolution ouvre des perspectives passionnantes d'intégration des données et de modé-

lisation des phénomènes biologiques et moléculaires qui représente un véritable défi pour le domaine, car elle va impliquer une évolution profonde des compétences au sein des équipes de recherche. L'interdisciplinarité entre les sciences expérimentales et formelles est appelée à devenir un des cœurs d'activité des domaines scientifiques couverts par la section 22. Ces approches sont amenées à modifier considérablement notre compréhension de l'organisation chromosomique ainsi que notre image des processus épigénétiques affectant le contrôle de l'expression des gènes, ainsi que la réparation, la recombinaison et la réplication du génome.

Les connaissances obtenues ces dernières années ont permis de mettre en évidence les rôles essentiels de la chromatine et des ARNs régulateurs dans le contrôle de l'activité des génomes. Le mot « épigénétique » est passé rapidement d'un statut périphérique à central, perdant au passage un peu de précision dans la définition de son sens, puisque maintenant il s'applique aussi bien aux phénomènes et aux molécules « autour » du génome et affectant sa fonction qu'aux mécanismes d'hérédité non classique qui reposent sur ces mêmes phénomènes. Les progrès des connaissances dans le rôle de l'organisation chromatinienne et de ses modifications dans le contrôle de l'expression génétique sont trop nombreux pour être listés et détaillés ici.

Les enjeux pour l'avenir concerne aussi bien la mise en évidence de nouvelles activités enzymatiques que la compréhension de leurs fonctions, mais aussi la compréhension des structures chromatinienne d'ordre supérieur et des liens entre ces structures chromatinienne et l'architecture nucléaire. La compréhension de ces phénomènes se heurte à des problèmes méthodologiques car ils impliquent des échelles supramoléculaires qui sont mal décrites par les approches microscopiques. Les progrès déjà réalisés dans le domaine de la chromatine et de la mémoire épigénétique ont permis de mettre en évidence clairement le rôle des perturbations de ces modifications dans un grand nombre de pathologies et particulièrement au cours de la cancérogénèse. Ceci

a permis à la fois de développer des approches diagnostiques, mais aussi thérapeutiques (des drogues interférant avec la méthylation de l'ADN sont en phase III d'essais cliniques contre certaines tumeurs, par exemple). La caractérisation des enzymes affectant l'expression génétique et dont le dysfonctionnement est avéré dans des situations pathologiques ouvre la voie pour le développement de molécules thérapeutiques, ce qui montre clairement l'importance que la compréhension fondamentale de ces mécanismes peut avoir pour le développement de nouvelles approches thérapeutiques.

Un deuxième niveau de contrôle de l'expression génétique et qui peut se trouver aussi au cœur des mécanismes épigénétiques concerne l'ARN. Là aussi, les progrès des connaissances fondamentales ouvrent des perspectives thérapeutiques à court et moyen terme. Il semble que les petits ARNs non-codants aient un rôle quasi universel et très conservé au cours de l'évolution. Ils ont des fonctions classiques (biogenèse des ribosomes, spliceosome) et contrôlent également l'expression génique par le système d'ARN interférence qui cible la stabilité des ARN messagers. Ils sont également impliqués dans certains cas dans des modifications de la structure chromatinienne. Ils sont impliqués dans des processus aussi variés que le développement embryonnaire, le contrôle des réarrangements géniques, le contrôle de la transposition et autres. Chez les procaryotes, ce domaine est également en plein essor et intervient dans l'expression génique, même s'il n'utilise pas les mêmes voies que chez les eucaryotes. La maturation post transcriptionnelle des ARN et particulièrement l'épissage permet une diversification importante du génome exprimé et joue un rôle clef dans la complexité des patrons d'expression des protéines, tout particulièrement chez les vertébrés, où le nombre d'introns contenus dans la plupart des gènes de protéines est considérable.

Des progrès importants ont permis l'identification et la caractérisation de nombreux facteurs de cette machinerie. Néanmoins, beaucoup reste encore à faire pour com-

prendre comment cette machinerie extrêmement complexe s'assemble de manière spécifique au niveau des sites d'épissage et catalyse l'élimination des introns ainsi que dans la compréhension des liens unissant épissage et organisation chromatinienne du génome qui apparaissent de plus en plus clairement. De nouvelles pistes thérapeutiques sont actuellement développées ciblant les facteurs d'épissage. De nombreuses découvertes concernent aussi les édifices moléculaires qui contrôlent le devenir de l'ARNm dans le cytoplasme – traduction, stockage et dégradation. Ainsi, depuis 4 ans, des avancées majeures ont été réalisées dans l'inventaire des ARN qui interviennent dans l'expression des gènes (découverte des ARN non codants longs en plus des micro-ARN), et dans la diversité des protéines qui lient l'ARN. Ces découvertes ont amené une meilleure connaissance de la variété des assemblages ribonucléoprotéiques (RNP) impliqués dans les processus contrôlant l'épissage des ARN messager, leur stabilité, leur dégradation et leur accumulation sous forme de granules nucléaires ou cytoplasmiques. Les laboratoires du CNRS ont été précurseurs dans nombre de ces domaines – remodelage de la chromatine, structure des RNP, régulation de l'épissage et de la dégradation des ARN messagers, ARN non codants – et ont acquis une solide réputation internationale. Le soutien constant du CNRS dans ces domaines permettra d'affermir cette réputation et d'exploiter ces découvertes pour aboutir à une compréhension intégrée de l'expression des gènes et de la plasticité du génome.

Il n'y a pas que l'expression du génome dont le dysfonctionnement intervienne dans un grand nombre de maladies dont les cancers, la stabilité et la plasticité des génomes joue aussi un rôle important. De nombreuses données montrent que la transformation tumorale est associée à l'instabilité génomique. Stress réplicatif, déficit de réparation de l'ADN, recombinaison désordonnée jouent tous des rôles importants dans l'étiologie des anomalies génétiques associées au cancer et sont observables dans les tissus pré-néoplasiques. Pour étudier en détail les mécanismes de la stabilité, de la plasticité génomique, et de la surveillance

du génome, l'utilisation des systèmes modèles est là aussi indispensable. Il est maintenant clair que l'organisation chromatinienne joue un rôle pour l'ensemble des « 3R » (Réplication, réparation, recombinaison), comme pour l'expression génétique, comme le montre, par exemple, la découverte récente qu'une enzyme de méthylation de la chromatine jouait un rôle clef dans la détermination de la position des points chauds de recombinaison méiotique. La compréhension fondamentale de ces mécanismes et de la manière dont ils sont liés aura donc des retombées aussi bien cognitives que thérapeutiques.

D'importants progrès ont également été faits dans la connaissance des processus qui permettent à la cellule de s'adapter aux variations de son environnement, aux changements programmés de son état de prolifération ou de différenciation, ou à la signalisation des stress affectant le génome. Pour répondre aux modifications de leur environnement, les cellules eucaryotes utilisent des cascades de phosphorylation qui gouvernent les réponses aux hormones, aux facteurs de croissance, aux stress et à la disponibilité en nutriments, et qui permettent la transduction de signaux externes vers les machineries transcriptionnelles et traductionnelles. Ces voies de signalisations contrôlent aussi bien la synthèse protéique et la croissance cellulaire que la transcription ciblée des gènes gouvernant, entre autres, le métabolisme énergétique, l'adipogenèse ou l'angiogenèse. Leur dérégulation est à l'origine de pathologies prolifératives ou métaboliques. Notre compréhension de ces voies de signalisation et de leurs rapports au vieillissement, à l'apport en nutriments et aux stress liés aux carences et à l'environnement est un atout pour l'élaboration de nouvelles molécules bioactives et pour l'exploration de nouvelles approches thérapeutiques.

## **BACTÉRIOLOGIE, MICROORGANISMES EUCARYOTES ET GÉNOMES**

La microbiologie englobe l'étude des procaryotes et des eucaryotes unicellulaires. Elle touche à plusieurs domaines non-exclusifs dont la plupart ont une composante inter-disciplinaire, et qui peuvent être classés en (1) étude des machineries moléculaires, (2) microbes et santé, (3) microbes et environnement, (4) génomique et métagénomique des microbes. Les microbes sont les outils de choix pour analyser les réactions biologiques grâce à la possibilité d'en isoler les acteurs et les étapes, et parce qu'ils permettent l'accès à l'ensemble des réactions impliquées dans le fonctionnement et la multiplication d'un organisme vivant.

La microbiologie est un domaine privilégié pour décrypter les mécanismes moléculaires responsables des réactions biologiques dans les organismes vivants. Les machineries moléculaires des procaryotes et des eucaryotes unicellulaires sont simplifiées par rapport à celles des organismes plus complexes, de par la limitation des assemblages multi-protéiques et des modifications post-traductionnelles. Ces machineries assurent des fonctions universelles, qui correspondent à des activités biologiques et enzymatiques fondamentales, présentes dans tous les organismes vivants. Un exemple de concept issu de l'étude des organismes unicellulaires et maintenant généralisé à tous les organismes vivant est le rôle important des « accidents de réplication » dans l'instabilité des génomes. D'autre part, l'accessibilité et la simplicité des machineries moléculaires des organismes unicellulaires a permis le développement de techniques de microscopie et d'imagerie, et de techniques d'analyse en molécule unique sophistiquées et performantes. À côté de ces techniques qui représentent une interface avec la physique, le crible de chimiothèques bloquant l'action d'enzymes particuliers est un exemple d'interface avec la chimie. Le CNRS est, de par sa mission de développement des connaissances,

l'organisme scientifique où ces études moléculaires fondamentales doivent être soutenues. Le décryptage précis des mécanismes moléculaires qui sous-tendent le vivant constitue également le passage obligé du développement de la biologie synthétique dont les enjeux aussi bien fondamentaux qu'appliqués sont potentiellement immenses. Dans ce cadre, les microorganismes seront sans aucun doute les modèles expérimentaux de choix pour les projets de création «*ex nihilo*» de systèmes biologiques complexes.

Le rôle du CNRS est également de favoriser l'extension des études des phénomènes fondamentaux vers les microorganismes procaryotes ou eucaryotes qui jouent un rôle important en pathogénicité ou dans le fonctionnement des écosystèmes. L'élargissement des études moléculaires à une plus grande variété d'espèces microbiennes, pathogènes ou commensales permet de définir les bases fondamentales de la pathogénicité. On peut citer par exemple la découverte des mécanismes par lesquels certaines bactéries pathogènes intègrent de l'ADN exogène et donc évoluent, ou les études des mécanismes d'assemblage des systèmes d'adhésion utilisés par les procaryotes pour l'infection des cellules eucaryotes cibles. La description de la régulation des facteurs de pathogénicité est également une composante importante qui doit s'appuyer sur les études réalisées dans les microorganismes les mieux connus.

Le rôle des microorganismes dans le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes doit être abordé sous l'angle de la génomique ou de la métagénomique, avec une interface importante avec la bioinformatique, la génétique des populations et l'écologie. Les progrès des techniques de séquençage ouvrent de nouvelles voies de compréhension de l'évolution dans différents habitats et pour analyser la biodiversité au sein d'un écosystème (e.g., projets «*métagénome*» pour analyser la diversité microbienne ou virale). L'exploration de la biodiversité microbienne par séquençage révèle aussi l'existence de nouvelles activités enzymatiques qui pourront être caractérisées. Enfin de nouvelles fonctions moléculaires, sources de

nouveaux concepts, émergeront comme par le passé de l'étude des microorganismes vivant dans des conditions extrêmes.

## **ÉVOLUTION DES GÉNOMES, GENOMIQUE COMPARATIVE ET PALÉOGÉNOMIQUE**

On a pu croire qu'après le séquençage du génome humain la course aux génomes allait ralentir. On assiste en réalité à une forte accélération. Cette accélération, facilitée par l'apparition de nouvelles techniques de séquençage rapides et peu coûteuses, est due à l'intérêt de comparer les génomes et d'explorer les divergences évolutives à différentes échelles, depuis les études intra-spécifiques jusqu'aux analyses regroupant les grands domaines du vivant. À ce jour, environ 1 000 génomes de bactéries, archées ou eucaryotes sont entièrement séquencés et disponibles publiquement. Les progrès réalisés dans la longueur des lectures des nouvelles techniques de séquençage ainsi que l'élaboration de nouvelles stratégies d'assemblage de génome adaptées aux données issues de ces machines permet d'envisager une progression spectaculaire du nombre de génomes séquencés dans les années à venir. Grâce à ces données et aux nouvelles approches «*phylogénomiques*», c'est à dire se fondant non pas sur l'analyse de quelques gènes mais sur l'intégralité du génome, il devient envisageable d'élucider la phylogénie du vivant. Ce large échantillonnage taxonomique est particulièrement utile pour l'annotation des génomes (i.e., l'identification des gènes et autres éléments fonctionnels) par analyse comparative de séquences. Ces données offrent également une opportunité unique pour analyser la variabilité des répertoires de gènes et ainsi mieux comprendre l'adaptation des espèces à leur environnement (et notamment l'évolution de la virulence chez des orga-

nismes pathogènes). Le séquençage massif ouvre la voie à la « génomique des populations » – c'est à dire à l'analyse de la variabilité génétique au sein d'une population à l'échelle génomique. Ainsi, le projet de séquençage de 1 000 génomes humains permettra non seulement de connaître l'histoire et la dynamique des populations de notre espèce mais également d'identifier les régions du génome soumises à pression de sélection (et donc impliquées dans l'adaptation de l'homme à son environnement) et d'analyser les mécanismes mutationnels à l'origine de la diversité génétique. Ces données serviront également de référence pour identifier des mutations impliquées dans des pathologies. Ainsi, le séquençage de génomes complets est une approche très prometteuse pour l'identification des mutations ponctuelles ou des aberrations chromosomiques impliquées dans des cancers.

La reconstitution des événements évolutifs à partir des génomes présents nécessite parfois des interpolations qui peuvent être erronées suite à l'extinction de lignage ou à des approximations erronées des mécanismes génétiques. La possibilité d'apporter des données complémentaires permettant de tester la validité des modèles d'interpolation utilisés en déterminant des portions de séquence des génomes anciens provenant de traces fossiles sort maintenant du cadre de la science-fiction. Il a ainsi été possible d'obtenir des couvertures très honorables des génomes du mammoth, de l'homme de Néanderthal et d'un autre hominidé apparenté, le Denisovien. L'analyse du génome du Néanderthalien a permis de mettre en évidence les portions du génome humain sous pression sélective intense depuis la divergence des lignées de l'homme moderne et du Néanderthalien. Elle a aussi permis de montrer l'existence de flux génétiques passés entre ancêtres des humains modernes et Néanderthaliens et Denisoviens qui éclairent sous un jour nouveau l'histoire évolutive du génome humain. La mise en évidence de pressions sélectives s'exerçant sur des portions du génome, et la capacité de dater ces pressions, permettent d'éclairer la fonction postulée des gènes impliqués et donc contribuera aussi à une meilleure compréhension des relations

entre génotype et phénotype dans des situations normales et pathologiques. On peut aussi s'attendre, par exemple, à ce que l'analyse de génomes ancestraux d'organismes domestiqués par l'homme, en utilisant des fossiles datant du début de cette domestication, permette d'aider à l'identification de régions génomiques responsables de caractères d'importance agronomique.

## GÉNÉTIQUE HUMAINE

Génétique humaine et maladies génétiques ont toujours été parmi les secteurs d'intervention de la section 22 qui est historiquement la section de génétique. Ces thématiques touchent à beaucoup de disciplines telles que clinique, épidémiologie, biologie cellulaire, physiologie, etc. et font donc appel aux expertises d'autres sections des sciences de la vie et de l'INSERM notamment. Les efforts dans ces domaines sont très largement soutenus par des fondations (LNCC, ARC, AFM, FRM, etc.), et l'industrie pharmaceutique. Actuellement, ces recherches vont de la recherche des gènes morbides et de leurs mutations à la caractérisation moléculaire et cellulaire des mécanismes impliqués jusqu'aux applications thérapeutiques (par transfert de gènes ou mise en évidence de cibles médicamenteuses par exemple). Ces efforts impliquent dans la plupart des cas des réseaux collaboratifs importants. À titre d'exemple, des progrès notables ont été obtenus dans de grands groupes de maladies tels que maladies neuromusculaires (myopathies), neurosensorielles (surdités), diabète et obésité. Des progrès importants dans l'efficacité d'association de gènes ou de régions génomiques avec des pathologies ont été réalisés récemment grâce aux approches de génotypage à très haut débit, qui reposent actuellement sur des puces à ADN. Le séquençage à très haut débit commence à être utilisé dans ce contexte, bien que son utilisation ne se substituera pas avant longtemps aux approches de criblage par puces d'un

grand nombre d'individus (patients et contrôles de même famille) nécessaires pour chaque pathologie.

Toutefois, les éclairages apportés par le séquençage d'un grand nombre d'individus de différentes populations humaines aura certainement un impact sur le choix des SNPs à interroger selon les populations considérées, voire sur l'interprétation des données. Il paraît important à cause de cela de maintenir le lien entre les diverses analyses génomiques que ce soit génomique fonctionnelle ou génomique des populations, avec la génomique des maladies génétiques.

D'autre part, l'évolution à la baisse prévisible des coûts de séquençage entrainera certainement une augmentation importante du nombre de situation pathologiques qui seront analysées par ces approches, ce qui rendra de plus en plus important les liens entre recherche génomique fondamentale et appliquée. Un certain nombre de chercheurs s'intéressant aux aspects pathologiques des maladies génétiques sont rattachés au CNRS et à la section 22, et bien qu'une partie de leur activité puisse relever d'autres organismes, il paraît important de maintenir leur lien avec les approches génomiques plus cognitives qui sont bien représentées au sein de la section 22. Il nous paraît donc que la génétique humaine, particulièrement celle liée aux approches génomiques, a toujours sa place au sein de cette section.

## BIOINFORMATIQUE

L'analyse globale des génomes requiert le développement d'outils informatiques importants. A ce titre, la biologie s'est rapprochée récemment des sciences formelles (mathématiques, physique, informatique) pour traiter les énormes masses de données produites, mais des efforts sont à poursuivre pour que la concertation entre ces disciplines conduise à un meilleur rendement de données exploitables en analyse et/ou en modélisation,

notamment dans la reconstruction dynamique des réseaux de régulation. Comme discuté auparavant, les progrès des techniques de séquençage ont ouvert la voie à de nombreux champs d'application au-delà du séquençage de génomes. Désormais le séquençage « haut débit » permet d'analyser et quantifier l'expression des gènes (RNAseq), de détecter les interactions ADN-protéine (ChIPseq) ou ARN-protéine, de quantifier la méthylation de l'ADN (MethylC-Seq), d'analyser les processus de réplication, de recombinaison, l'organisation des chromosomes dans le noyau (5C), etc. Ainsi il devient possible non seulement d'étudier la diversité génétique (entre espèces ou entre individus), mais également les modifications épigénétiques des chromosomes et leurs conséquences sur l'expression des gènes. Bref, ces nouvelles techniques révolutionnent l'étude de l'organisation et du fonctionnement des génomes. Par ailleurs, les progrès techniques ne sont pas limités au séquençage. On assiste à la multiplicité des «-omics» (proteomics, metabolomics etc.). Toutes ces nouvelles approches ont transformé la biologie moléculaire moderne d'une science « pauvre en données » en une science « riche en données ». Cette nouvelle donne représente un défi pour la bioinformatique. D'une part, le volume de données à traiter pose des difficultés algorithmiques importantes. D'autre part, les changements dans la nature même des données impose de nouveaux développements (e.g., les méthodes statistiques développées pour l'analyse de données de puce à ADN ne sont pas directement transposables aux données de RNAseq ; les outils d'alignement de séquences couramment utilisés – tels que BLAST – ne sont pas adaptés aux nouveaux types d'analyse de séquence). Les enjeux sont considérables car ces nouvelles données permettent d'envisager, dès à présent, des analyses intégrées allant des séquences complètes des génomes aux conséquences phénotypiques de mutations, en passant par les aspects structuraux et fonctionnels sur les différents acteurs cellulaires. Face à ce volume croissant de données complexes et hétérogènes, l'intégration des données couplée à des analyses bioinformatiques comparatives et prédictives est cruciale pour réaliser la

description étendue de la fonction d'un gène et de la compréhension de son rôle non seulement au niveau moléculaire, mais également aux niveaux supérieurs des voies cellulaires, des complexes macromoléculaires, de la cellule ou de l'organe.

Il paraît donc un enjeu essentiel de réaliser des progrès dans l'analyse bioinformatique aussi bien en ce qui concerne le développement de nouveaux algorithmes, que dans l'analyse des données issues des approches expérimentales. Une attention particulière doit être portée à l'efficacité des transferts de problématiques et d'analyses et d'interprétations des données entre bioinformaticiens et biologistes expérimentaux. Les progrès les plus importants ont été réalisés à l'étranger dans des centres qui avaient su faire cohabiter, sur des sites avec une unité géographique, les différentes compétences afin que s'établisse une véritable culture de l'interdisciplinarité et afin qu'émerge à l'interface des scientifiques avec des compétences doubles qui assurent l'efficacité optimale des flux d'informations interdisciplinaires. Les structures et leurs périmètres d'influence doivent être conçus de façon à favoriser cette interdisciplinarité et à éviter que la bioinformatique formelle continue à maintenir une distance importante avec la biologie expérimentale, distance qui paraît préjudiciable à l'évolution des domaines liés à la génomique. L'association à la section 22 d'une composante bioinformatique génomique forte dans le cadre d'un futur redécoupage des contours des sections paraît un enjeu stratégique devant être sérieusement considéré.

## **BIOLOGIE DES SYSTÈMES, BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE**

Dans les domaines scientifiques couverts par la section 22 un changement de fond est en train de s'opérer. En effet, la vision de plus en plus claire des limites du réductionnisme pour résoudre les problèmes complexes (relation

génotype-phénotype, métabolisme et physiologie...) implique la nécessité d'aborder ces problématiques avec des outils nouveaux. La biologie des systèmes semble être l'alternative émergente mais cette discipline n'a pas encore pleinement fait ses preuves ni atteint sa maturité. Les années à venir seront déterminantes pour l'essor de cette discipline et pour le positionnement des groupes français qui participeront à ce glissement méthodologique. Cette discipline est toujours en cours d'installation et il est important de soutenir les programmes de qualité l'utilisant. Comme pour la bioinformatique, et d'une façon qui y paraît intimement liée, il faut privilégier les structures qui feront cohabiter intimement approches expérimentales de génomique, analyses et développement bioinformatiques et modélisation formelle. Il faut encourager les initiatives tout en prêtant la plus grande attention à la qualité scientifique des intervenants et des réalisations effectuées. L'interdisciplinarité nécessite des personnalités capables de s'aventurer aux marges de leurs frontières de compétence mais le succès de cette interdisciplinarité requiert que leur compétence cœur soit forte.

La Biologie synthétique paraît aussi être un débouché de fort potentiel qui pourrait émerger de l'interdisciplinarité entre génomique expérimentale, bioinformatique, modélisation et biologie des systèmes. En effet, non seulement les coûts de séquençage des génomes semblent suivre la loi de Moore appliquées à la croissance exponentielle des capacités de calcul des ordinateurs, mais aussi ceux de la synthèse chimique d'ADN. Les technologies développées pour la synthèse *in situ* de puces à ADN ont ainsi été adaptées pour produire des séquences utilisables pour des approches enzymatiques, ce qui rend possible la synthèse de très grands fragments d'ADN. La possibilité de rendre concrète la production d'organismes virtuels offre de multiples possibilités, allant de la synthèse de molécules complexes ou de biocarburants par des organismes reprogrammés, à des organismes ou des cellules senseurs dont les propriétés s'adapteraient aux fluctuations de l'environnement de la manière souhaitée. Parmi les tentatives de prédiction futuriste existant dans la

littérature, on trouve par exemple la proposition de créer des cellules qui seraient sensibles à la proximité de cellules cancéreuses et qui libéreraient alors des toxines les ciblant. Afin de préparer le terrain à l'émergence de ce domaine, il paraît essentiel de permettre et de favoriser les rassemblements de compétence autour des approches expérimentales et formelles de biologie génomique.

## RECOMMANDATIONS

Ce rapport de conjoncture a largement discuté en quoi les différents domaines scientifiques évalués par la section 22 étaient influencés dans leurs évolutions récentes et à venir par l'avènement des technologies de séquençage à très haut débit et l'analyse bioinformatique des données. Ces mutations technologiques, méthodologiques et conceptuelles représentent un enjeu stratégique pour permettre à la France de maintenir une position d'importance dans le paysage scientifique mondial dans les domaines de la génétique, la génomique et la microbiologie, et de se placer à un niveau respectable dans les domaines en émergence de la biologie des systèmes et la biologie synthétique. Afin de répondre à cet enjeu, nous recommandons de favoriser la généralisation de l'accès à ces techniques et à l'analyse bioinformatique des données afin qu'elles deviennent des outils de routine des approches de biologie expérimentale, au même titre que la biologie moléculaire au début des années 1980. Il nous semble qu'il faille profiter de l'opportunité de décentralisation de la génomique rendue possible par les technologies actuelles et futures pour faciliter la diffusion de ces approches conceptuelles et permettre l'adoption de cette nouvelle culture par le plus grand nombre possible de biologistes expérimentaux. Ceci signifie qu'il ne faille pas reculer devant les efforts financiers et les investissements humains que cela représente afin de permettre de faire cohabiter à la fois au moins un grand centre fort de

génomique et de multiples structures périphériques. Il est clair que les investissements matériels devront être renouvelés régulièrement car il est facile de prédire que les évolutions technologiques à venir correspondront à des évolutions d'importance qu'il ne faudra pas manquer. Toutefois, le changement culturel que représente l'adoption de modes de raisonnement formels reposant sur les outils informatiques et mathématiques est d'importance pour la majeure partie des biologistes et prendra nécessairement du temps. Le maintien de la compétitivité nationale dans des pans entiers de la biologie repose sur la rapidité avec laquelle ces approches seront adoptées par un grand nombre de biologistes et de la facilité avec laquelle ces biologistes expérimentaux seront à même de collaborer de manière fructueuse avec des biomathématiciens et bioinformaticiens. Afin de favoriser la diffusion de ces approches dans les laboratoires de biologie expérimentale, il faut rapprocher de ces laboratoires les centres de production de séquences et les équipes de bioinformatique et de biomathématiques. Ceci nécessite clairement de distribuer sur un nombre significatif de sites des investissements assez conséquents en moyens financiers et humains, mais aussi de créer des structures qui permettent de favoriser ces rapprochements. Un des moyens d'atteindre cet objectif est d'associer plus étroitement les instances d'évaluation des biologistes et des bioinformaticiens de la génomique, un rapprochement qui paraît aussi se justifier compte-tenu du rapprochement des domaines scientifiques correspondants.

Le dynamisme et la compétitivité de la recherche biologique en France repose clairement sur une évolution des moyens financiers qui lui permette de faire face à l'importante évolution à la hausse des coûts des technologies et des investissements consentis par les autres pays développés comme par les pays émergents. Bien que les sciences biologiques représentent une part très importante du personnel du CNRS, la part des moyens attribués par le CNRS à ces disciplines n'a pas évolué significativement depuis plusieurs dizaines d'années alors que le domaine a subi déjà plusieurs mutations profondes et que les

moyens alloués à ce domaine ailleurs sur la planète ont profondément augmenté. Cette situation a déjà affaibli le rôle joué par le CNRS dans ces disciplines, et si rien n'est fait pour reverser cette situation dans les années à venir, ce rôle finira par devenir marginal. Il nous paraît que cette évolution, même si elle peut paraître acceptable à un certain nombre de biologistes, risque de compliquer très significativement en France le développement de la biologie interdisciplinaire alliant génomique, mathématique et bioinformatique, car le CNRS est un acteur majeur regroupant un nombre important de ces compétences en son sein. De ce point de vue, la section 22 regarde avec inquiétude la diminution régulière des postes ouverts au recrutement CR dans ses domaines de compétence, diminution qui lui paraît excessive compte tenu du poids important de cette section qui compte parmi celles qui ont le plus grand nombre de chercheurs rattachés. Alors que le domaine correspondant est en pleine mutation, la sous-représentation des recrutements frais par rapport à la base importante des laboratoires rattachés ne peut qu'entraîner le déclin du rôle du CNRS dans des thématiques scientifiques d'avenir et lui faire manquer l'émergence d'un domaine fortement interdisciplinaire.

L'évolution actuelle des sources de financement va clairement dans le sens d'une diminution des moyens d'intervention du CNRS et, via l'ANR et le grand emprunt, à une redistribution des moyens vers un petit nombre d'équipes et de sites au détriment d'un grand nombre d'équipes performantes. On observe une évolution récurrente vers un accroissement déraisonnable des écarts de financements alloués aux différentes équipes, officiellement justifiée par une différence de performance des équipes considérées. Toutefois, il paraît à notre instance d'évaluation que les critères d'évaluation utilisés pour justifier ces écarts de financement peuvent être discutés et que d'autres instances d'évaluation pourraient aboutir à des constats sensiblement différents. Particulièrement, les écarts de financements ne sont bien souvent pas proportionnels aux écarts de qualité scientifique qui peuvent être évalués. Cette politique qui revient en fait à étouffer progressivement une proportion significative d'équipes performantes pour faire des économies budgétaires porte en elle une diminution inéluctable de la qualité scientifique globale de la recherche française car il signifie une diminution du nombre des centres de formation des chercheurs performants de demain : si on enlève le bas de la pyramide, son sommet perdra de l'altitude.



# 23

---

## **BIOLOGIE CELLULAIRE : ORGANISATION ET FONCTIONS DE LA CELLULE ; PROCESSUS INFECTIEUX ET RELATIONS HÔTE/PATHOGÈNE**

*Président*

Jean-Michel MESNARD

Monsef BENKIRANE

Annie BOSCH-SAVARY

Nadine CAMOUGRAND

Mounira CHELBI-ALIX

Shaynoor DRAMSI

Pascale DURBEC

Jérôme ESTAQUIER

Yannick GACHET

Ines GALLAY

Ludger JOHANNES

Patricia KRIEF

Jean-Jacques LACAPÈRE

Jochen LANG

Florence LARMINAT

Isabelle MUS-VETEAU

Gérard PÉHAU-ARNAUDET

Vincent PEYROT

Claudine PIQUE

Michel RIGOULET

Artur SCHERF

La notion que la cellule vivante est l'unité fondamentale de tous les organismes vivants est née de la confrontation des travaux du botaniste Mathias Jacob Schleiden et du zoologiste Théodore Schwann, il y a moins de deux siècles. Au fil des années, les progrès dans la connaissance de la cellule se révélèrent être tributaires des progrès techniques associés au développement de la biologie cellulaire et moléculaire, de la biophysique et de la bioinformatique.

Les équipes rattachées à la section 23 du Comité National travaillent dans ce contexte d'interface pour continuer à accumuler de nouvelles connaissances sur l'organisation structurale et dynamique de la cellule (cytosquelette, membrane et protéines membranaires, trafic cellulaire) ainsi que sur son fonctionnement dans son environnement (signalisation, division cellulaire, mort cellulaire) et sa dérégulation lors d'interaction hôtes-agents infectieux ou impliquée dans le développement de pathologies.

Dans les pages suivantes, nous résumons les résultats récents dans ces différents domaines et décrivons les perspectives liées à la publication de ces nouvelles données.

# 1 – ORGANISATION DE LA CELLULE

## 1.1 CYTOSQUELETTE ET MOTEURS

La vision traditionnelle du cytosquelette en tant qu'ossature cellulaire a évolué au cours des dix dernières années vers une perception beaucoup plus dynamique des réseaux de microfilaments qui se polymérisent *de novo* en réponse aux stimuli extérieurs et s'organisent pour assurer des fonctions cellulaires extrêmement variées comme la migration, la phagocytose, la cytokinèse ou la polarité cellulaire.

- De très nombreux composants de la machinerie contrôlant l'assemblage et l'organisation des filaments d'actine ont été identifiés. Une des avancées majeures dans ce domaine a été l'identification du complexe Arp2/3 et de protéines de la famille des formines qui sont capables de nucléer les filaments d'actine *de novo*. Les mécanismes moléculaires de la nucléation par ces molécules sont en voie d'être élucidés et les voies de régulation de ces nucléateurs par les GTPases Rho ont été décryptées. Un des domaines ayant permis des avancées rapides dans l'élucidation de ces mécanismes a été l'étude de l'entrée de bactéries dans leurs hôtes cellulaires (*Listeria*, *Shigella*). Un autre aspect concerne la mise en évidence récente du rôle de l'assemblage de l'actine dans les mécanismes de transport intracellulaire faisant intervenir des moteurs moléculaires de type myosine ou basés directement sur la polymérisation de l'actine à la surface de la vésicule générant la force nécessaire à la propulsion.

- Le déplacement directionnel à longue distance des intermédiaires de transport dans les cellules animales implique les microtubules sur lesquels se déplacent des moteurs moléculaires de type dynéine ou kinésine. L'ensemble des moteurs moléculaires classiques (myosine, kinésine et dynéine) chargés des mouvements intracellulaires ont été identifiés et on a à présent de bonnes notions concernant leur fonc-

tion cellulaire. Cependant, selon le type cellulaire, les microtubules sont sujets à de grandes variations architecturales (taille et forme). Ces fluctuations sont la conséquence des propriétés dynamiques uniques aux microtubules. Un des nombreux défis des recherches sur ce thème est la compréhension des mécanismes moléculaires qui contrôlent ces propriétés dynamiques. Ainsi, des travaux récents montrent l'existence de polymérasés (XMAP215) qui favorisent la croissance et de dépolymérasés (MCAK ou Kip3p) qui réduisent la taille des microtubules. Cependant, des études seront encore nécessaires afin d'explicitier les relations entre ces polymérasés et dépolymérasés avec des protéines telles que tau et stathmine. Les études de pointe dans ce domaine vont des études biophysiques et de la détermination des structures cristallines des protéines ou des complexes purifiés aux études de la visualisation dynamique des mouvements intracellulaires.

- Au cours des dernières années, il est apparu, contrairement à la croyance générale, que les procaryotes possédaient également des protéines apparentées aux tubulines et à l'actine. Ces protéines sont tout aussi impliquées dans le contrôle de la division cellulaire. Si des domaines protéiques appartenant à la famille des ATPase ont été identifiés, leur rôle dans la division cellulaire reste encore à définir.

Les enjeux du futur seront de déterminer les propriétés de ces différents acteurs filament ou moteur en relation avec la physiologie cellulaire et de proposer des modèles mathématiques afin d'intégrer la notion de cytosquelette dans une approche de biologie des systèmes.

## 1.2 MEMBRANES, PROTÉINES MEMBRANAIRES ET BIOENERGÉTIQUE

Les protéines membranaires ont un rôle physiologique essentiel et leurs dysfonctionnements sont souvent responsables de maladies

importantes, ce qui en fait des modèles d'étude et des cibles thérapeutiques particulièrement intéressantes. Cependant, les informations concernant la fonction et la structure de ces protéines sont limitées par les difficultés rencontrées pour les étudier *in vitro* en raison de leur faible niveau d'expression naturelle et de leur forte hydrophobicité. Ces difficultés sont accentuées dans le cas des protéines membranaires de mammifère par la nécessité d'exprimer ces protéines en système hétérologue pour en produire suffisamment et pouvoir les caractériser *in vitro*.

- D'après le site [http://blanco.biomol.uci.edu/Membrane\\_Proteins\\_xtal.html](http://blanco.biomol.uci.edu/Membrane_Proteins_xtal.html), une croissance exponentielle du nombre de structure 3D de protéines membranaires est observée depuis 2000. 231 structures de protéines membranaires sont à ce jour (Mars 2010) présentes dans la Protein data bank, ce qui reste très faible par rapport au nombre de structures de protéines solubles (environ 42 000). Depuis 2005, année de la résolution des structures des deux premières protéines membranaires de mammifère recombinantes, la Calcium ATPase du réticulum sarcoplasmique du muscle de lapin et le canal potassium voltage dépendant, onze nouvelles structures de protéines membranaires de mammifère recombinantes ont été résolues dont quatre de la famille des Récepteurs Couplés aux Protéines G (RCPG) : la rhodopsine, le récepteur  $\beta 2$  adrénergique, le récepteur  $\beta 1$  adrénergique et le récepteur à l'adénosine. Cette rapide évolution dans la résolution de la structure des protéines membranaires de mammifère est liée aux progrès majeurs réalisés ces dernières années dans différents domaines dont le développement de systèmes d'expression hétérologues de plus en plus efficaces (dans lequel de nombreuses équipes françaises se sont investies malgré le faible facteur d'impact des publications dans ce domaine) et le développement de stratégies de stabilisation des protéines membranaires en solution. En effet, l'instabilité en solution est un des plus gros obstacles à la cristallisation des protéines membranaires. La modification du récepteur  $\beta 2$  adrénergique par fusion avec le lysozyme T4 ou l'utilisation de mutants augmentant la stabilité en solution du récep-

teur  $\beta 1$ -adrénergique et du récepteur à l'adénosine a permis la résolution de la structure 3D de ces récepteurs. Enfin, l'utilisation de robot de cristallisation nano-gouttes a permis de réaliser des essais de cristallisation avec des quantités beaucoup plus faibles de protéines. Ceci constitue une grande avancée pour des protéines aussi difficile à produire.

Il sera donc important de continuer à améliorer l'expression hétérologue des protéines membranaires afin de favoriser la production de protéines fonctionnelles en quantité suffisante pour la cristallisation et de développer l'étude des conditions permettant de stabiliser les protéines membranaires en solution comme par exemple la recherche de surfactants moins agressifs que les détergents classiques permettant de maintenir les protéines membranaires stables et actives en solution. En effet, les détergents nécessaires à l'extraction des protéines de la membrane et à leur maintien en solution sont souvent déstabilisants, voire dénaturants, et ceci constitue un obstacle majeur pour la cristallisation. Ceci implique une collaboration forte entre chimistes et biologistes. En outre, les recherches réalisées en RMN des protéines membranaires représentent une alternative à la cristallisation pour les protéines membranaires de petite taille. De plus, la RMN permet de réaliser des études de relations structure-fonction en observant le ligand de la protéine membranaire par exemple. Enfin, il faudrait développer des algorithmes permettant la modélisation de la structure 3D des protéines membranaires dans leur environnement lipidique.

- Les mécanismes mis en jeu lors de l'assemblage des complexes enzymatiques membranaires des bactéries et des organites intracellulaires des eucaryotes restent partiellement décrits et les régulations indispensables à ces assemblages sont peu comprises. Le cas des complexes bactériens est plus simple (un seul génome et pas de mécanisme d'import des protéines). Chez les eucaryotes, ces complexes sont le plus souvent constitués d'un assemblage de protéines dont certaines sont codées par le génome nucléaire et d'autres par le génome de l'organite (mitochondrie et plastides). Leur biogénèse nécessite l'assistance

de nombreuses protéines auxiliaires intervenant à tous les niveaux du processus : expression des protéines codées par le génome de l'organite, expression et import des protéines codées par les gènes nucléaires, insertion des différentes sous-unités dans la membrane, parfois addition des groupements prosthétiques, assemblage des holoenzymes dans un ordre rigoureux et selon une stoechiométrie précise, intervention de processus de maturation conduisant souvent à la formation de dimère et parfois à la mise en place de super-complexes. Tous ces événements sont strictement contrôlés et régulés par une signalisation assurant la coordination noyau/organite. Il convient pour chaque complexe d'identifier les différents facteurs impliqués, de caractériser la dynamique de leur relation et de comprendre les mécanismes d'action mis en jeu aux « checkpoints » de régulation.

- Des observations assez anciennes, comme l'inhibition de la respiration par l'activation de la glycolyse (l'effet Warburg), par exemple, mise en évidence dans de nombreux types cellulaires, n'ont pas trouvé d'explication satisfaisante même si certains facteurs de régulation ont pu être identifiés. Ceci souligne la nécessité de développer une approche plus globale du métabolisme, de mettre en œuvre une étude des biosystèmes articulant modélisation, quantification rigoureuse des différents flux métaboliques et analyse des métabolites par des méthodes très sensibles (spectrométrie de masse) afin d'obtenir une description précise de la dynamique de ces systèmes complexes.

Dans le cas des mécanismes moléculaires des couplages énergétiques dans les voies de photosynthèse et d'oxydation phosphorylante (procaryotes et eucaryotes), la connaissance précise des structures d'un nombre de plus en plus conséquent de transducteurs d'énergie devrait conduire à la compréhension du fonctionnement, au niveau moléculaire, de ces convertisseurs d'énergie. Le développement de ce champ de recherche qui n'est pas nouveau dans le domaine de la bioénergétique est cependant indispensable à la constitution d'un corpus de connaissances nécessaires à l'étude des différentes activités de la cellule.

## **2 – DEVENIR CELLULAIRE, SIGNALISATION ET DYNAMIQUE INTRACELLULAIRE**

### **2.1 SIGNALISATION ET TRANSPORT MEMBRANAIRE**

La cellule est constituée d'organites et de sous-domaines membranaires dont la description statique initiale a été reconsidérée au cours des dernières années grâce à la multiplication de traceurs membranaires fluorescents et au développement de techniques d'imagerie de la cellule vivante. La vision actuelle, nettement moins stricte, est celle de sous-domaines reliés par un continuum très mobile d'intermédiaires. L'organisation en sous-domaines est probablement une propriété intrinsèque des membranes biologiques, entraînant des particularités fonctionnelles, comme l'illustre l'hétérogénéité latérale, induisant la présence de microdomaines membranaires riches en cholestérol et sphingolipides où sont concentrées les protéines de signalisation. Il est probable que certaines étapes du transport, par exemple dans l'appareil de Golgi, s'effectuent également par transformation progressive de la composition membranaire.

À cette nouvelle vision gradualiste des compartiments s'ajoute une composante cinétique intracellulaire, révélée par l'observation de mouvements directionnels extrêmement dynamiques de compartiments le long des réseaux d'actine et de microtubules, assurés par des moteurs moléculaires. Le noyau et la mitochondrie, deux compartiments contenant l'ADN de la cellule eucaryote, ont depuis longtemps focalisé une attention particulière. Le lien entre structures sub-nucléaires et expression génique est un champ de recherche très actif. La mitochondrie, organite très dynamique principalement connu comme source majeure de production d'ATP et siège de nombreuses réactions métaboliques, intervient également

dans les processus de mort cellulaire apoptotique. Un défi de la biologie cellulaire est de comprendre comment les processus fondamentaux tels que la division cellulaire, et plus généralement, l'engagement d'une cellule vers différents devenir, corrélerent aux changements de nature et de dynamique des compartiments cellulaires. Cette connaissance aura un impact majeur sur la compréhension globale du développement de pathologies, qu'il s'agisse de cancérogenèse, de dégénérescence ou d'infections.

La division cellulaire, indissociable du vivant, est un processus au cours duquel se posent des problèmes de plusieurs ordres : comment transmettre chromosomes, organites et sous-compartiments membranaires à chaque cellule fille, comment générer les forces permettant la partition des composants et la cytokinèse, comment assurer la chronologie correcte des différentes étapes, quels mécanismes et quelles cibles sont affectés au cours de la sénescence.

Plus généralement, le « déterminisme cellulaire » décrit l'impact des changements d'environnement sur la physiologie cellulaire et son adaptation. Cela concerne l'ensemble des modifications cellulaires engendrées par les couples récepteur/ligand (signalisation cellulaire), ainsi que l'impact des changements de milieu (éléments nutritifs, pH, oxygène, etc.). Au cours des dernières années, l'analyse des voies de signalisation a mis en évidence de nouvelles modifications post-traductionnelles des protéines, telles que l'ubiquitination et sumoylation, et l'importance des compartiments sous-membranaires, dans les réponses cellulaires englobées par la notion de déterminisme (croissance, prolifération, différenciation, adhérence, motilité, apoptose, autophagie).

Ces problématiques sont abordées dans une vingtaine d'unités dépendant de la section 23, au sein desquelles plusieurs équipes couvrent divers aspects de la dynamique des compartiments à la signalisation, modelant le devenir de la cellule.

- Un des fondements de l'évolution des procaryotes vers la cellule eucaryote est la

ségrégation des fonctions cellulaires au sein d'organites distincts. Cette compartimentation, qui répond à une complexification et une optimisation des fonctions cellulaires, est accompagnée par la mise en place de systèmes de communication entre les différents compartiments assurant ainsi la coordination des fonctions cellulaires. Les échanges entre compartiments dépendent de signaux cytologiques mais également de transferts directs de composants à travers des mécanismes de transports vésiculaires et non-vésiculaires.

- Le trafic vésiculaire procède par bourgeonnement d'une vésicule, son transport et finalement sa fusion avec la membrane cible. Nous avons une vue générale de ce mécanisme et le plupart de facteurs protidiques nécessaires ont été identifiés : les protéines de manteaux, les complexes SNARE, les complexes d'arrimage, les petites GTPases Rab, et les moteurs moléculaires. Cependant, nous comprenons à l'heure actuelle encore très peu comment ceci se déroule du point de vue mécanistique au niveau de la membrane même. Un premier pas dans cette direction a été accompli par la reconstitution du processus de fusion membranaire sur liposomes. Sur la base de ces expériences, un modèle mécanique a pu être proposé selon lequel les protéines SNARE jouent un rôle central dans le rapprochement membranaire à des distances fusionnelles. Cette activité clé, dont le mécanisme exacte reste à préciser, est accompagnée par les facteurs d'accostage et les protéines Rab qui augmentent largement l'efficacité du processus. Cette démarche de reconstitution sur des liposomes de plus en plus sophistiqués, est maintenant plus largement utilisée et offre la perspective d'une complexification croissante des systèmes expérimentaux, rendant ainsi possible la compréhension moléculaire des mécanismes réactionnels. Vu l'hétérogénéité dynamique des membranes et ses constituants, ces approches doivent être combinées avec les techniques de points d'investigations cellulaires afin de fournir une description réelle et physiologique.

- C'est au niveau de la déformation membranaire que les progrès ont été les plus spec-

taclaires dernièrement. La structure en forme de corbeille que forment spontanément les molécules clathrine a largement dominé la pensée dans ce domaine en suggérant que la membrane est passivement déformée en se collant sur la face concave de la lattice de clathrine. Cette notion est aujourd'hui mise en question et il semble possible que d'autres forces telles que la courbure spontanée soient les véritables inducteurs de la déformation membranaires conduisant à la formation des bourgeons. Les systèmes de reconstitution permettront d'aborder cette question clé de façon rigoureuse.

Un autre développement spectaculaire qui prend sa source dans les tests de reconstitution met la courbure membranaire au cœur de l'orchestration des réactions biochimiques qui conduisent à la formation et au détachement du bourgeon membranaire. Des expériences visionnaires ont mis en évidence la dépendance du rayon de courbure membranaire de certains processus de liaison sur membrane ou de l'activité catalytique d'enzymes associées aux membranes. Il en découle un modèle très stimulant de contrôle mécano-chimique de la cascade de réaction qui conduit à la formation du bourgeon et de son processing par scission. Des boucles d'amplification réciproque entre courbure et activité enzymatique permettraient de créer des séquences réactionnelles très robustes.

Un autre nouveau concept est corrélatif à ce modèle de couplage mécano-chimique : le confinement réactionnelle par le détachement du bourgeon (ou *budding*). Alors que le bourgeon est colinéaire avec la membrane donneuse ce qui permet un échange de protéines et lipides membranaire par diffusion, le détachement annule cette possibilité, ce qui conduit à l'accumulation ou à la déplétion d'espèces moléculaires (protéines ou lipides) lorsqu'une activité enzymatique est confinée dans l'espace limité du bourgeon détaché. Ce concept explique probablement le détachement des différents manteaux vésiculaires (ou *uncoating*), notamment la clathrine et le manteau COPI.

- Les tests de reconstitution ont aussi commencé à jeter une lumière nouvelle sur l'hypo-

thèse raft. La formulation initiale partait du postulat de l'existence à l'état d'équilibre thermodynamique d'assemblages lipidiques auxquels s'associeraient les protéines membranaires selon leur affinité relative pour un environnement lipidique de type raft (glycosphingolipides et cholestérol). Malgré tous les efforts consentis, ce type de structures membranaires n'a pas pu être mis en évidence dans les membranes biologiques et des résultats récents suggèrent fortement qu'elles doivent être induites pour être porteur d'informations biologiques. De façon remarquable et inattendue, il s'avère que les membranes biologiques de différentes origines sont proches d'une limite de phase à la température physiologique, de manière tel qu'un inducteur approprié peut les faire basculer d'un état homogène à un état de formation de nanodomains. Ce type de réorganisation induite à l'échelle mésoscopique génère des forces aux interfaces entre domaines (tension de ligne) et il se pose alors la question de savoir comment la cellule s'en sert pour assurer des fonctions biologiques. Trois grandes orientations se dégagent actuellement : la génération de courbure membranaire, la scission membranaire, le tri des lipides.

- En dehors des méthodes modernes de reconstitution, d'autres avancés techniques ont accéléré la vitesse de découverte en biologie membranaire. La microscopie photonique repousse constamment les limites de résolution temporelle et spatiale, et des techniques de tomographie en microscopie électronique offrent une vue ultrastructurale en trois dimensions des échantillons biologiques. Des approches systémiques, notamment le crible siRNA à l'échelle génomique, tardent à percer dans le domaine du trafic et de sa régulation. Cependant, le potentiel est énorme.

## 2.2 DIVISION CELLULAIRE

La division cellulaire a toujours fasciné les biologistes. L'identification des CDK (cyclin-dependent kinases) a grandement bénéficié

des études réalisées sur des systèmes biologiques modèles tels que les levures. Une étape décisive a été de montrer que ces mécanismes sont conservés au cours de l'évolution. Différents processus contribuent au contrôle du cycle cellulaire : la phosphorylation de protéines cibles par les CDK, la régulation périodique des cyclines responsables de l'activation périodique des CDK, les modifications (phosphorylation, SUMOylation, ubiquitination, etc.) des CDK et le caractère processif de ces mécanismes biochimiques.

La fidélité de la réplication du génome ou l'intégrité de l'ADN sont contrôlés avant la mitose afin de préserver la stabilité génomique. La fidélité de la division cellulaire repose sur la mise en place du fuseau mitotique, sur l'attachement correct des chromosomes au fuseau et sur la coordination précise entre la ségrégation des chromosomes et le début de la cytotinèse. Les travaux des dernières années ont révélé que trois mécanismes de surveillance régulaient ces processus. Les points de contrôle (checkpoints) mitotiques sont capables de ralentir le cycle cellulaire en réponse à un défaut d'attachement des chromosomes à l'appareil mitotique. Les voies biochimiques initialement identifiées dans les levures se sont révélées là encore hautement conservées chez les eucaryotes supérieurs. Après l'activation des points de contrôle mitotiques, les défauts d'attachements des chromosomes peuvent alors être corrigés grâce à l'activation d'une kinase qui influence la dynamique des microtubules. La présence de chromosomes retardataires ou perdus sur l'appareil mitotique semble réguler négativement l'entrée de la cellule en cytotinèse. La révolution technologique apportée par l'utilisation de protéines fluorescentes en microscopie (GFP, RFP, etc.), les caméras à haute sensibilité et la génétique puissante (siRNA ou délétions) ont conduit à des avancées spectaculaires dans le domaine de la dynamique des chromosomes en mitose comme en méiose.

Le fuseau mitotique est organisé en ses deux pôles par un complexe protéique appelé centrosome ou SPB (Spindle Pole Body) chez les levures. La duplication anar-

chique de ces pôles semble désorganiser la mitose, phénomène observé dans de nombreuses lignées cellulaires cancéreuses. Des avancées majeures de la recherche fondamentale sur le modèle levure ont démontré que des protéines associées aux centrosomes sont non seulement responsables de l'initiation de la citocinèse mais aussi importantes pour la correction des défauts d'attachement des chromosomes à l'appareil mitotique.

Notre compréhension de l'organisation des chromosomes a progressé de façon importante par la cartographie des cohésines et des condensines, deux complexes protéiques responsables respectivement de la cohésion des chromatides sœurs et de la compaction de la chromatine en mitose. L'étape ultime du cycle cellulaire est la citocinèse (conduisant à la séparation physique des cellules filles). Les mécanismes biochimiques découverts grâce aux approches de protéomique et des combinatoires de génétique et microscopie dans divers modèles cellulaires révèlent encore une universalité des processus biologiques. Si de nombreux mécanismes ont été découverts dans le cycle cellulaire, le challenge des prochaines années portera sur plusieurs points : découvrir le ou les mécanismes qui conduisent les cellules à sortir du cycle (quiescence), caractériser les fonctions de certaines protéines pour maintenir cet état et étudier l'imbrication et la coordination des différentes étapes du cycle cellulaire entre elles.

## 2.3 MORT CELLULAIRE

Les cellules peuvent être amenées à croître, à proliférer, à se différencier, à subir des stress ou des changements d'environnement, à entrer dans un état de quiescence ou bien à mourir. Des travaux assez divers portant sur l'autophagie, l'apoptose, la nécrose ou la prolifération cellulaire ont fait émerger l'hypothèse que la mitochondrie, chez les eucaryotes non-photosynthétiques, jouait un rôle central dans l'ensemble des processus gouvernant le devenir cellulaire et faisait souvent partie pre-

nante de leur signalisation. La membrane interne de cet organite sert de récepteur/émetteur pour de nombreux facteurs actifs qui, en relation avec l'état énergétique, semblent déterminer l'évolution des fonctions cellulaires. De plus, de nombreuses pathologies résultent d'un dysfonctionnement mitochondrial. Les disciplines et les modèles d'étude (levure, *C. elegans*, drosophile, cellules de mammifères) développés dans notre section placent certaines des unités au coeur de cette problématique.

- La mort cellulaire programmée (MCP) est un mécanisme de suicide cellulaire, qui joue un rôle essentiel dans de très nombreux processus physiologiques comme pathologiques, et revêt un caractère universel de la biologie dans la mesure où vie et mort sont indissociables. L'importance de ce phénomène en biologie fut reconnue en 2002 par l'attribution du prix Nobel de Médecine aux Docteurs Sydney Brenner, John Sulston, et Robert Horvitz. L'apoptose représente un des phénotypes majeurs de cette MCP et pas moins de 175 000 références ont été publiées sur ce thème. Les processus d'apoptose se caractérisent par l'expression constitutive de ces effecteurs. Ainsi, les cellules de l'organisme expriment des cystéines protéases (caspases) nécessaires à l'induction de la phase effectrice de l'apoptose. La survie de chaque cellule dépend, en permanence, de la réception de signaux paracrines induisant l'expression de gènes qui permettent de bloquer l'induction de celle-ci. Des anomalies dans l'expression de gènes, l'émission ou la transduction de signaux qui entraînent une diminution du seuil de déclenchement de ces programmes, induisent des phénomènes de MCP prématurée qui peuvent aboutir à des pathologies caractérisées par la déplétion de certaines populations cellulaires ou à des anomalies de leur fonctionnement. Inversement des anomalies dans l'expression de gènes, l'émission ou la transduction de signaux qui entraînent une augmentation du seuil de déclenchement de ces programmes, induisent des phénomènes de survie aberrante qui peuvent aboutir à des pathologies caractérisées par des hyperplasies, des cancers, ou des réponses auto-immunes.

Plusieurs laboratoires supportés par le CNRS ont été pionniers dans cette thématique, notamment dans l'implication des molécules Fas et son ligand dans l'apoptose lymphocytaire T, et dans le rôle de la mitochondrie dans ces processus (organite qui par ailleurs est essentiel à la cellule pour lui fournir l'énergie nécessaire à son fonctionnement). Le cytochrome c est la clef de voûte de ces processus, impliqué non seulement dans la voie biochimique de l'apoptose mais également dans le fonctionnement de la chaîne respiratoire. L'implication de la mitochondrie dans ces mécanismes a été ensuite étudiée par plusieurs groupes. D'autres chercheurs se sont aussi intéressés aux aspects moléculaires de ce processus : insertion et activation des protéines dans la membrane externe de la mitochondrie, interactions diverses entre les différents acteurs et régulation.

- L'induction ou le blocage des programmes de mort cellulaire constituent également un déterminant important dans les interactions hôtes/pathogènes, et jouent un rôle essentiel dans la persistance ou l'élimination des agents infectieux et dans le développement ou non d'une pathologie. Ainsi, des travaux pionniers menés par des équipes du CNRS ont permis de mettre en évidence l'implication de ce processus dans le cadre de l'infection par le VIH-1. De plus, la survenue de cette apoptose prédit l'évolution vers la maladie et est associée au caractère pathogène de cette infection comme le suggère les études d'infections lentivirales pathogènes et non pathogènes chez les Primates Non Humains. De plus, il a été montré que la mort des macrophages qui est induite par les infections bactériennes s'accompagne de l'activation de la caspase1 et participe dans l'induction d'une inflammation. Cette MCP est dénommée Pyroptosis.

En outre, un dysfonctionnement de ces processus d'apoptose participe également dans le développement de cancers. En particulier, un nouveau concept a émergé au cours de ces dernières années qui est basé sur l'observation que certains récepteurs exprimés en l'absence de leurs ligands sont capables d'induire la mort de ces cellules. L'anoikis qui est

également un processus apoptotique est induit par une interaction inappropriée ou inadéquate des intégrines à leurs substrats et les cellules se détachent de la matrice extracellulaire.

- Bien que l'apoptose représente un des mécanismes majeurs de la mort cellulaire programmée, l'observation que des inhibiteurs à large spectre des caspases n'inhibent pas toujours celle-ci a conduit plusieurs équipes à étudier d'autres processus biochimiques comme l'autophagie. L'autophagie décrite dès les années 60 n'a véritablement émergé que très récemment. Ainsi, les 4/5<sup>e</sup> des quelques 5000 publications ont été réalisées au cours des 7 dernières années. L'autophagie est un processus plus complexe puisqu'il peut être assimilé à une mort programmée de type II ou bien jouer un rôle dans la survie des cellules. C'est un programme cellulaire dévolu au catabolisme/recyclage de structures sénescents ou pas allant des macromolécules solubles jusqu'aux organites entiers. Elle se caractérise soit par la formation d'autophagosomes qui séquestrent de façon non spécifique du matériel cytoplasmique avant de l'adresser vers la voie de dégradation lysosomale ou vacuolaire, soit par invagination de la membrane des lysosomes ou des vacuoles qui capturent des portions de cytoplasme. Des études sur la levure ont permis d'identifier les acteurs moléculaires qui régissent les différentes étapes de ce processus (protéines Atgs). Le processus d'autophagie étant conservé chez tous les eucaryotes, la plupart des acteurs ont également été identifiés chez les eucaryotes supérieurs ainsi que les voies de signalisation. Stimulée en cas de stress, en particulier lors de carences nutritives, l'autophagie est d'abord un programme de survie permettant à la cellule d'adapter son métabolisme aux conditions externes. Si l'activité catabolique devient incompatible avec la survie, elle induit la mort cellulaire de façon autonome ou bien associée aux processus apoptotiques.

- À côté de cette autophagie non sélective, il a été récemment mis en évidence des processus plus spécifiques ciblant une organelle comme par exemple le peroxysome (pexophagie), le noyau (nucléophagie), les ribosomes

(ribophagie) et la mitochondrie (mitophagie). A l'heure actuelle, certains travaux sur les cellules de mammifères se focalisent sur le rôle des protéines Parkin, Pink1, Nix, Bnip3 et Bnip3L dans l'élimination des mitochondries par autophagie. Comme pour l'apoptose, l'autophagie peut aussi jouer un rôle important dans l'élimination des cellules infectées. D'autres travaux ont montré que les agents pathogènes inhibent la machinerie d'autophagie de manière à faciliter leurs répliquations et leurs disséminations. Ainsi, certaines protéines codées par les agents infectieux sont capables d'inhiber les molécules impliquées dans la machinerie d'autophagie conduisant à une autophagie abortive. Ce mécanisme pourrait représenter un mécanisme d'échappement du virus à la réponse immunitaire de son hôte.

- Un nouveau concept a récemment été proposé selon lequel, indépendamment de changement éventuel quant à l'expression des membres pro- et anti-apoptotiques de la famille de Bcl-2, la morphogénèse mitochondriale participerait dans la susceptibilité à l'apoptose. En effet, la morphologie du réseau mitochondrial dépend de l'équilibre entre les événements de fission et de fusion qui implique d'une part Fis1 et Drp1 (Dynamine-related protein 1) et d'autre part les protéines appelées Mitofusines (Mfn1 et Mfn2) et OPA1 (Optic atrophy type 1). En particulier, il a été montré qu'OPA1 joue un rôle essentiel sur le modelage des crêtes. Ainsi, un déficit d'expression ou une altération d'expression suite à l'activation de protéases conduit à une sensibilité accrue aux signaux apoptotiques, et favorise la sortie du cytochrome c. Enfin, bien que les caspases soient inhibées, il a été montré que certains stimuli de mort conduisent à une dégradation de la mitochondrie. Ce nouveau concept dénommé Mitoptose pourrait représenter un nouveau mécanisme essentiel dans la régulation de la vie et la mort des cellules.

- Les lysosomes sont des organites cellulaires qui participent à la digestion des protéines et organites endommagés, et sont en interface étroite avec les processus d'autophagie, en formant à partir des autophagosomes des autophagolysosomes. La libération

des protéases dans le cytosol suite à la perméabilisation des lysosomes conduit à l'activation de l'apoptose. Ainsi, en particulier les cathepsines activent les protéines pro-apoptotiques Bax et Bid, impliquées dans la perméabilisation mitochondriale. En outre, il a été montré que cette perméabilisation des lysosomes peut engendrer une mort cellulaire indépendante des caspases. Il faut noter que dès les années 60, les lysosomes ont été au centre des interactions hôtes/pathogènes. Dans ce contexte, il a été rapporté récemment que le VIH-1 entraîne une perméabilisation des lysosomes ce qui pourrait rendre compte de la mort des lymphocytes T CD4<sup>+</sup> qui s'apparente à une mort par nécrose. Récemment, il a été mis en exergue que la nécrose comme l'apoptose pourrait être contrôlée génétiquement et a été dénommée Nécroptosis.

Ainsi, la recherche sur les mécanismes de mort cellulaire programmée revêt un intérêt général et crucial quant à la compréhension de nombreux mécanismes physiologiques et pathologiques. En effet, comprendre comment ces différents mécanismes qui participent dans la survenue ou l'inhibition de ces programmes de mort est d'un intérêt majeur non seulement pour la biologie du vivant mais intéresse tout autant l'industrie. À ce jour le nombre de « leads » identifiés reste faible, l'industrie anglo-saxonne étant leader dans ce domaine. L'émergence de cette thématique depuis une vingtaine d'année a permis à plusieurs groupes du CNRS de se positionner comme leaders internationaux dans ce domaine. Toutefois, du fait de sa jeunesse, une des faiblesses est peut être le faible nombre d'unités actuelles réellement structurées autour de cette thématique, celles-ci travaillant essentiellement aujourd'hui sur la cancérologie. En dépit de l'intérêt de cette thématique pour de très nombreuses équipes, et du fait qu'il existe des programmes soutenus par l'ANR, et les associations contre le Cancer, ces financements sont toutefois insuffisants pour permettre le développement harmonieux de nouvelles équipes dans d'autres domaines. Il est important de souligner que le CNRS soutient un réseau sous la forme d'un GDR qui regroupe les différents acteurs travaillant autour de la mitochon-

drie. Cependant, il est également important d'attirer l'attention sur le fait que nombres de ces acteurs partiront à la retraite d'ici les 5 prochaines années et pourraient contribuer à un déclin de cette thématique au sein du CNRS.

## 2.4 SIGNALISATION ET PATHOLOGIES

Des défauts dans les voies de signalisation contribuent à de très nombreuses pathologies dont de nombreux cancers. La connaissance de l'ensemble des voies de signalisation, l'identification de leurs composants protéiques et de leurs interactions sont essentielles à la compréhension du rôle de ces voies de signalisation dans les différentes pathologies et à l'élaboration de thérapies ciblées et efficaces.

De plus en plus de pathologies apparaissent liées à des dysfonctionnements des cellules souches dans différents tissus et organes chez l'adulte. C'est le cas des maladies neurodégénératives mais aussi d'un nombre croissant de cancers. Certaines maladies neurodégénératives présentent des défauts dans la capacité des cellules souches à régénérer les cellules neuronales. La présence de cellules souches cancéreuses a été mise en évidence dans de nombreux cancers. Ces cellules possèdent les propriétés des cellules souches de résistance aux drogues et d'auto-renouvellement et seraient responsables des métastases. L'auto-renouvellement des cellules souches met en jeu des voies de signalisation comme Notch, Wnt ou encore Hedgehog. L'inhibition de la voie Hedgehog serait impliquée dans des défauts de régénération des cellules neuronales, alors que les cellules souches cancéreuses présentent une activation aberrante de cette voie. Il apparaît donc très important de soutenir les recherches sur ces voies de signalisation impliquées dans l'auto-renouvellement des cellules souches chez l'adulte d'un point de vue fondamental mais aussi pour leur potentiel impact thérapeutique.

Un autre aspect émerge depuis quelques années dans l'étude des cancers : le rôle des canaux ioniques et leur régulation. Il y a de plus en plus d'études montrant une modification d'expression des canaux ioniques dans les tumeurs. Il est intéressant de comprendre l'implication des canaux ioniques dans les cancers car ce sont des cibles potentielles pour lesquelles la pharmacologie est souvent assez bien établie.

## 3 – PATHOGENES ET RELATIONS HÔTES-PATHOGENES

### 3.1 VIRUS

L'étude des virus reste d'un intérêt majeur à la fois à cause des conséquences que peuvent avoir les infections virales sur la population mondiale mais aussi grâce leur utilisation comme outils dans l'étude des mécanismes fondamentaux qui régulent le fonctionnement d'une cellule. En outre, au fil des années, le nombre de virus caractérisés ne fait que croître. Par exemple, en 2007, deux nouveaux polyomavirus humains, KIPyV et WUPyV, ont été caractérisés par criblage moléculaire dans des échantillons du tractus respiratoire de malades.

- En 2008, un autre polyovirus, le MCPyV, a été associé au carcinome à cellules de Merkel (MCC) qui est un cancer neuroectodermique de la peau, rare mais agressif. Ce cancer est mortel dans un tiers des cas, son incidence augmentant partout dans le monde. Il survient en priorité chez les personnes âgées immunodéprimées. En outre, son incidence a augmenté de 11 fois parmi les malades du SIDA. Le génome viral est intégré dans l'ADN des cellules tumorales à différents sites chromosomiques ce qui suggère que l'infection virale précède l'expansion clonale des cellules tumorales. Des mutations empêchent la réplication

du génome viral. Ainsi, la réplication ou l'intégration modifiées du MCPyV pourrait être impliquée dans le développement du phénotype malin. Le MCC pourrait être le premier exemple d'un cancer de l'homme dû à un polyomavirus.

- Le génome des polyomavirus est capable de coder pour des miARN viraux (vmiARN) qui permettraient au virus de contourner la réponse immunitaire en régulant négativement l'expression des gènes précoces. Un vmiARN, le miR-M1, a été récemment caractérisé chez MCPyV. Ce vmiARN est différent des autres vmiARN déjà identifiés chez les autres polyovirus. Cependant aucun lien direct entre son expression et le pouvoir oncogénique du MCPyV n'a été établi. Par contre, l'implication de vmiRNA dans des cancers induits par d'autres oncovirus a été proposée. Ainsi, l'expression de vmiRNA dans le carcinome gastrique associé au virus Epstein-Barr suggère qu'effectivement les miRNA produits par l'EBV pourraient jouer un rôle dans le développement de ce cancer. Des vmiRNA ont été identifiés chez tous les herpesvirus. Ainsi, l'expression des gènes cellulaires a été analysée dans des cellules exprimant les vmiRNA du KSHV, un herpesvirus associé au sarcome de Kaposi. Cette étude a permis de démontrer que dans ces conditions le niveau d'expression de la thrombospondine (protéine impliquée dans l'adhésion cellulaire, la migration et l'angiogenèse) était diminué de 10 fois. Ainsi les oncovirus coderaient pour des vmiRNA capables de perturber l'expression de protéines impliquées dans le contrôle de la prolifération cellulaire. Cependant, l'inverse est aussi vrai c'est-à-dire que des protéines virales pourraient aussi déréguler l'expression de miRNA cellulaires impliqués dans la transformation cellulaire. Des travaux récents confirment l'implication de l'oncoprotéine Tax de HTLV-1 (virus impliqué dans le développement de la leucémie T chez l'adulte) dans la dérégulation de l'expression de miRNA cellulaires dans des lymphocytes T transformés par HTLV-1. Ces dernières années, de nombreux travaux ont donc confirmé l'importance de la production de vmiRNA ou l'implication de la régulation de l'expression de miRNA cellulaires

par des protéines virales. Les liens directs entre ces effets et la transformation cellulaire induite par les oncovirus restent cependant encore à démontrer. Il serait utile de réaliser des études dans ce sens sur des cellules de patients ayant développé des tumeurs induites par ces oncovirus.

- La description d'infections humaines par le XMRV donne un autre exemple spectaculaire de passage inter-espèce et de la potentialité de l'émergence de nouvelles pathologies. Ce nouveau virus est phylogénétiquement lié aux gammarétrovirus xénotropes de souris retrouvés chez des souris sauvages et dans certaines lignées murines de laboratoire. Sa présence chez l'homme a été d'abord décrite en 2006 dans des échantillons de tumeurs de la prostate, sans toutefois établir de corrélation entre le virus et la pathologie. En 2009, une autre publication a décrit la forte prévalence de ce virus dans une cohorte de patients américains atteints du syndrome de fatigue chronique. Les données actuelles sont encore très conflictuelles, le virus n'ayant été retrouvé dans aucune cohorte de patients européens atteints de cette même pathologie ou bien de tumeurs de la prostate. La présence de XMRV chez l'homme n'en reste pas moins remarquable et il reste à comprendre comment ce virus de souris a pu passer chez l'homme. Il est également primordial d'éclaircir son pouvoir pathogène, la possibilité qu'un rétrovirus de souris donne lieu à des pathologies chez l'homme pouvant évidemment avoir des conséquences importantes en terme de santé publique.

- La compréhension des mécanismes permettant au virus de pénétrer dans les cellules hôtes fait toujours l'objet d'intenses recherches. On sait maintenant que la transmission de cellule à cellule est nettement plus efficace que la transmission virus/cellule. Les modalités de formation de la synapse virologique, décrite notamment pour le VIH-1 et le HTLV-1, ont été bien définies au niveau moléculaire et cellulaire mais il reste à comprendre comment les particules virales sont ciblées dans cette structure. D'autres modes de transmission par voie cellule-cellule ont également été décrits comme l'induction par les virus de prolonge-

ment membranaires (filopodes, cytonèmes, nanotubes) aux niveaux des cellules productrices (rétrovirus, virus de la dengue, Ebola, papillomavirus, virus de la vaccine). Un autre mécanisme décrit chez HTLV-1 début 2010 montre la formation de biofilms, réseaux de protéines intracellulaires et de protéines de la matrice extracellulaire permettant la concentration et le passage à la cellule cible des particules. Il est primordial de comprendre l'ensemble de ces modalités de transmission cellule-cellule en termes de connaissances des relations pathogènes/cellule mais également afin d'optimiser l'efficacité des stratégies visant à bloquer la propagation des virus dans l'organisme.

- Une question centrale reste de comprendre comment certains virus sont capables de contourner les défenses antivirales de la cellule et de l'organisme hôte. La réponse immunitaire innée de l'hôte, incluant la production de l'interféron, représente la première ligne de défense contre les virus. Plusieurs facteurs de transcription, produits de gènes suppresseurs de tumeur et produits de gènes induits par l'interféron sont modifiés. Il apparaît de plus en plus que certains virus utilisent l'ubiquitination et les modifications post-traductionnelles qui lui sont apparentés (la SUMOylation, l'ISGylation ou encore la Neddylation qui représentent respectivement l'ajout des peptides SUMO1 ou SUMO2/3, ISG15 ou Nedd8) pour cibler des protéines cellulaires qui jouent un rôle dans la défense antivirale. Ces modifications entraînent souvent une modulation de leur stabilité, de leur fonction et/ou leur localisation. Ce type de modification intervient aussi dans des processus biologiques aussi divers que la dégradation des protéines, l'endocytose, la transcription, la polarité cellulaire, la maintien de l'intégrité du génome, l'autophagie, l'apoptose, le cycle cellulaire, le transport nucléoplasmique ou encore la réponse à l'infection virale.

- La pandémie de grippe A/H1N1 (2009-2010) a fait beaucoup parler d'elle et a été l'occasion de revenir sur le passé et d'établir un constat des questions encore irrésolues. Comment estimer la propagation d'une infec-

tion, sa dangerosité, comment prédire sa survenue? Les pandémies de 1889, 1919, 1957 et 1968 ont été à une toute autre échelle. Celle de 1919 aurait causé entre 20 et 40 millions de morts soit 2% des sujets infectés (case-fatality ratio). L'infection se fait en phases: la dynamique de la propagation virale (le pic au jour 2) et la dynamique de la maladie (5 jours). L'outil d'étude de ces dynamiques, le VKSD (virus shedding and symptoms dynamics) vient de la pharmacologie. Les outils actuels de lutte sont les vaccins, les antiviraux, la mise en quarantaine et la fermeture des espaces publics comme les écoles. Les modèles de l'infection se fondent sur des hypothèses et des scénarios très sensibles aux hypothèses initiales. Les inconnues restent les paramètres de l'histoire naturelle (temps de génération, période d'incubation, nombre de reproduction, intervalle intergénérationnel, taux d'attaque), les routes de transmission (taille des gouttelettes, aérosol, contact avec les fomites, facteur trop peu étudié) et l'immunité de troupeau. Des données sont cependant acquises: le port du masque est inutile pour limiter l'infection, l'enfant est plus infectable et plus infectieux, il existe des terrains particuliers (femmes enceintes, personnes obèses, personnes vulnérables). Il faut supposer que 30 à 50% des 20-64 ans et 95% des plus de 64 ans sont immunisés. La sévérité de l'infection est très différente d'une pandémie à l'autre. Paradoxalement les questions qui restent pendantes portent sur le rôle des anticorps dans l'effet vaccinal, le rôle de l'adjuvant, et la définition d'une vague infectieuse.

- De nombreux virologistes leaders dans leur domaine et reconnus internationalement sont rattachés à la section 23. Citons à ce sujet l'attribution du Prix Nobel de médecine 2008 à Luc Montagnier qui a été dans le passé un chercheur rattaché à la section.

### 3.2 PARASITES

La parasitologie a une tradition de longue date en France. Par exemple, les pathogènes

responsables du paludisme et de la toxoplasmosose ont été découverts par des scientifiques français (Laveran en 1880 et Nicolle en 1908). De nos jours, la recherche se focalise principalement sur les pathogènes protozoaires qui infectent les humains vivant dans les pays tropicaux et subtropicaux. Parmi ceux-ci, les parasites comme *Plasmodium*, les trypanosomes africains et les leishmanies qui sont responsables de morbidité et de mort (le paludisme à lui seul tue chaque année deux millions d'enfants en Afrique). D'autres espèces de parasites protozoaires étudiés dans des laboratoires du CNRS, comme *Babesia* et *Theileria*, sont la cause de pertes importantes parmi les animaux domestiques. De nombreux parasites sont transmis par des insectes vecteurs et pourtant la recherche sur le phénomène vecteur des interactions hôtes-parasites a été relativement négligée en France en comparaison avec d'autres pays.

Beaucoup de parasites représentent encore une menace importante pour les humains malgré le développement de traitements anti-parasitaires. La résistance à beaucoup de médicaments s'étend désormais à toutes les régions endémiques de la maladie. Des efforts intensifs pour développer des vaccins efficaces contre les parasites affectant les humains ont été mis en oeuvre, mais ceci demeure un défi majeur. Il y a un besoin évident de soutenir le développement de nouvelles stratégies d'intervention en promouvant la recherche fondamentale. Bien que les parasites atténués puissent générer une bonne protection contre la maladie, leur utilisation se limite aux animaux domestiques.

La recherche sur les parasites continue à occuper une place prépondérante sur les programmes pour la recherche des principaux financeurs internationaux: la Commission européenne, le NIH, la fondation Gates et le Wellcome Trust. Les génomes des principaux parasites affectant les humains ont été séquencés et la recherche sur ces parasites est maintenant dans la phase post-génomique. Ceci a accéléré la compréhension des mécanismes spécifiques d'adaptation des parasites à leur hôte. Comprendre la biologie des pathogènes et de leurs interactions avec l'hôte permettra

d'appréhender leurs stratégies pour proliférer au sein de l'hôte et échapper à la destruction par son système immunitaire. Même si les parasites sont loin d'être des organismes modèles, les résultats de la recherche fondamentale sur ce sujet sont fréquemment publiés dans des revues scientifiques à fort impact, un fait qui continue à attirer des scientifiques de talent vers ce domaine de recherche.

Le CNRS est très présent au niveau international dans les domaines de la parasitologie cellulaire, biochimique et moléculaire avec plusieurs laboratoires reconnus internationalement et même considérés comme des leaders dans leur domaine comme le démontrent les résultats ci-dessous.

- Le développement du cycle de vie et les mécanismes spécifiques de défense envers le système immunitaire de l'hôte chez les parasites apicomplexes *Plasmodium* et *Toxoplasma* sont contrôlés par des facteurs épigénétiques. Un certain nombre de caractéristiques uniques qui n'avaient jamais été mises en évidence auparavant chez les modèles eucaryotes a été découvert, ce qui présente un intérêt majeur dans le domaine de l'épigénétique chez les parasites. Plusieurs cibles thérapeutiques potentielles des mécanismes épigénétiques ont été identifiées chez ces parasites, ce qui représente des lignes de recherche futures prometteuses au sein de ces laboratoires.

- La motilité cellulaire et l'invasion cellulaire par les parasites sont deux étapes clés d'une infection chronique réussie chez l'hôte. Les espèces *Trypanosomes* et *Leishmanies* utilisent un flagelle pour se mouvoir, une organelle qui, d'un point de vue structural, s'apparente aux flagelles ou cils chez l'hôte humain. Les flagelles chez ces parasites ont une fonction clé dans la survie du parasite, leur servant à se nourrir via la poche du flagelle et la division cellulaire. Le mécanisme qui contrôle l'ouverture de la poche du flagelle a représenté le Saint Graal dans le domaine et deux molécules clé qui forment cette structure circulaire autour du flagelle ont été identifiées.

- Le processus d'invasion des cellules hôtes par *Toxoplasma* est un thème de recherche très

compétitif que plusieurs groupes étudient en se focalisant sur le moteur actin-myosin moléculaire qui commande ce processus. Ce moteur nécessite une « jonction mobile » entre l'extrémité apicale du parasite et la membrane cellulaire de l'hôte afin de l'envahir. Ceci est une étape importante vers une meilleure compréhension des débuts du processus d'invasion. Le rôle de la cellule hôte dans l'invasion a longtemps été inconnu. Un rapport récent a montré que *Toxoplasma* provoque la formation d'une structure actine en forme d'anneau dans la cellule hôte à la jonction parasite-cellule, participant à l'entrée du parasite.

- Les infections parasitaires peuvent causer de graves maladies ou la mort, surtout chez les jeunes enfants ou les femmes enceintes infectées par les parasites du paludisme. Un modèle *ex vivo* de rate humaine isolée et perfusée a révélé une rétention inattendue de plusieurs érythrocytes recelant des étapes précoces de parasites. Ce modèle *ex vivo* ouvre de nouvelles voies pour l'étude du rôle de la rate dans le contrôle de la densité parasitaire chez l'humain. Une molécule d'adhésion de surface qui dirige le parasite vers le placenta a été identifiée. Des domaines recombinants de la molécule d'adhésion induisent des anticorps bloquant l'adhésion, un résultat prometteur qui pourrait déboucher sur le développement d'un vaccin protégeant les femmes enceintes des formes sévères du paludisme.

- La trypanosomiase humaine reste très présente en Afrique centrale et de l'Ouest et est mortelle si elle n'est pas traitée. Un modèle murin a été développé en utilisant des isolats de patients infectés et qui apparemment imite la progression de la morbidité par *Trypanosoma brucei gambiense*. Ce modèle murin pourrait révéler des facteurs de virulence spécifiques aux parasites et qui contrôlent l'aboutissement de la maladie chez l'humain.

- L'élucidation de la régulation de la biosynthèse de métabolites cruciaux pourrait aider à l'élaboration de nouveaux médicaments anti-parasitaires. Une nouvelle approche pharmacologique antipaludique basée sur l'inhibition du métabolisme plasmodial phospho-lipidique a été mise au point. Le médica-

ment imite la structure cholinique et inhibe la biosynthèse phosphatidylcholine *de novo*. Il est maintenant en phase de tests cliniques en collaboration avec Sanofi.

Un autre domaine de recherche intéressant est le trafic vésiculaire Rab-médié dans la maturation des parasites intracellulaires du paludisme. La protéine Rab11A a une fonction importante dans la genèse de la membrane plasmique de la cellule fille au cours de la division cellulaire. Les protéines Rab sont évidemment des cibles thérapeutiques anti-paludiques intéressantes.

Le CNRS héberge de nombreux groupes internationalement reconnus, dont certains sont leaders dans le domaine de la parasitologie. Un autre point à souligner est l'existence d'un lien solide avec l'industrie pharmaceutique française pour le développement de médicaments et de vaccins. Plusieurs laboratoires font de la recherche fondamentale de haut profil et en parallèle s'investissent considérablement dans de nouvelles stratégies d'intervention. Ces relations entre la recherche et l'industrie doivent être encouragées car elles peuvent constituer une plate-forme forte pour accroître la recherche translationnelle sur les principaux pathogènes de l'homme.

Cependant, le départ à la retraite de plusieurs parasitologues renommés dans les cinq prochaines années va créer des vides dans divers laboratoires du CNRS. La direction du CNRS pourrait mettre en place des programmes attractifs et des mesures de soutien pour les jeunes chefs de groupes en parasitologie. Actuellement il manque également une conférence annuelle ou semestrielle qui fédérerait la communauté française de parasitologie et permettrait de lancer des programmes de recherche communs (CNRS, ANR, etc.).

### 3.3 AUTRES AGENTS INFECTIEUX

Les bactéries appartiennent à la division des procaryotes (c'est à dire sans noyau) et

constituent une des trois grandes familles de l'arbre du vivant (avec les archées et les eucaryotes). De nature unicellulaire à répllication autonome, les bactéries constituent des organismes modèles simples permettant l'étude des grands processus cellulaires et moléculaires de la vie. Malgré de grandes avancées en matière de prévention et de traitement, les maladies infectieuses représentent un problème majeur de santé publique en particulier avec l'apparition récente de souches multi-résistantes aux antibiotiques. Face à ces nouveaux défis, la recherche internationale en microbiologie connaît une seconde jeunesse. Ainsi la microbiologie cellulaire constitue une nouvelle discipline mêlant étroitement la bactériologie, la biochimie, la biologie structurale et la biologie cellulaire. Il s'agit de comprendre comment les microorganismes communiquent entre eux, avec leur environnement ou avec leurs cellules hôtes. Ces processus de communication sont à la base de la pathogénie bactérienne ou du commensalisme. La découverte de nouveaux médicaments passera par la compréhension moléculaire de ce dialogue hôtes-pathogènes. Ce dialogue est par ailleurs à la base de fonctions physiologiques essentielles jusqu'alors négligées, tels que le rôle fondamental de la flore bactérienne dans le développement et le maintien de l'homéostasie intestinale ou le développement du système immunitaire de l'hôte. Enfin, les bactéries suscitent un grand espoir dans le domaine de l'environnement et à l'interface chimie-biologie, allant de la dépollution des sols, en passant par les bactéries utilisées comme détecteurs de mines anti-personnel jusqu'à la recherche de nouvelles réactions enzymatiques (séquençage de très nombreux génomes de bactéries non cultivables au laboratoire) pour la synthèse de polymères innovants.

Les maladies à prion et d'Alzheimer sont des désordres neurodégénératifs caractérisés respectivement par une maturation anormale de la protéine prion (PrPC) et du peptide amyloïde-béta (A $\beta$ ). Ces oligomères s'attaquent à la mémoire en perturbant les jonctions synaptiques entre neurones. Les récepteurs spécifiques médiant ces effets étaient inconnus. Des données très récentes montrent que

la PrPC joue un rôle critique dans la maladie d'Alzheimer. En effet elle interagit et inhibe la bêta-secretase, BACE1, l'étape enzymatique limitante dans la production de Abeta. Fait remarquable, la PrPC a été identifiée comme étant le récepteur des oligomères Abéta.

## 4 – RECOMMANDATIONS

Comme déjà mentionné dans ce rapport, de nombreux chercheurs et équipes du CNRS évalués par la section 23 sont reconnus internationalement dans les différents domaines en biologie développés ci-dessus. Cependant, cette reconnaissance risque d'être menacée si les soutiens financiers continuent à être sélectifs non pas sur des critères d'excellence mais sur des critères finalisés. Il faut faire attention à ne pas confondre la recherche en sciences biologiques avec la recherche biomédicale. Ne financer que des travaux sur des agents infectieux pathogènes pour l'Homme ou sur des mécanismes cellulaires soi-disant liés au développement de maladies comme le cancer risque d'avoir des conséquences préjudiciables à long terme. Une recherche fondamentale de qualité est nécessaire et indispensable à une recherche appliquée fructueuse. La mise au point de thérapies anti-SIDA (molécules anti-

transcriptase inverse ou anti-protéase à acide aspartique) développées grâce à des découvertes dues à des recherches réalisées sur des rétrovirus aviaires et murins en est un exemple frappant. On pourrait multiplier les exemples dans d'autres domaines comme les études sur la division cellulaire chez la levure pour mieux comprendre la perturbation des mécanismes cellulaires impliqués dans le développement de certains cancers. La majorité des chercheurs et des équipes de la section 23 s'inquiète de cette évolution malgré un discours qui se veut rassurant de la part du CNRS.

En outre, concentrer des financements très importants sur un petit nombre de chercheurs, souvent regroupés dans des grands centres de recherche, ne semble pas non plus une bonne stratégie pour garantir le renouvellement des idées et des découvertes. La recherche fondamentale a en permanence besoin de nouvelles idées et de nouvelles façons de penser car sa mission est avant tout de découvrir des mécanismes biologiques encore inconnus. Or, l'inconnu n'est pas prévisible et est souvent le fruit du hasard. La recherche a besoin de se tromper pour trouver la bonne voie et de temps pour confirmer ou non ses découvertes. Il est important que le CNRS retrouve les moyens qui lui permettront dans le domaine des sciences biologiques d'affirmer ses orientations et de soutenir ses équipes afin que ces dernières puissent rester des références internationales dans leur domaine.

# 24

---

## INTERACTIONS CELLULAIRES

### *Président*

Bruno LUCAS

### *Membres de la section*

Jean-Vianney BARNIER

Ulrich BLANK

Francis CASTETS

Christophe COMBADIÈRE

Francine COTE

Marie-Caroline DIEU-NOSJEAN

Aline DUMUIS

Anne HUCHENQ-CHAMPAGNE

Armelle LETURQUE

Fatima MECHTA-GRIGORIOU

Julie MERVILLE-DECHANET

Pierre PAOLETTI

Joël PESTEL

Éric PINAUD

Serge ROCHE

Michel ROUX

Paule SANTANTONIO

Michael SCHUBERT

Nathalie SPASSKY

La mission de recherche de la section 24 vise à comprendre comment les réseaux de cellules s'organisent dans le temps et dans l'espace pour conférer aux cellules les propriétés qui leur sont propres. L'objectif de ce vaste domaine de recherche est de comprendre comment des signaux, émis ou reçus, modifient le destin des cellules ou leur activité, et organisent les réseaux cellulaires. De façon plus précise, il s'agit d'analyser comment des signaux, en général de nature chimique (hormones, cytokines, chimiokines, neuromédiateurs, molécules d'adhérence, métabolites, etc.) ou physique (lumière, charge électrique, tension superficielle, etc.), sont transformés en informations significatives. Ces informations tendent à adapter le fonctionnement d'une cellule à celui d'un réseau ou d'un organe ou à modifier le destin des cellules (mitose, différenciation, apoptose) en fonction de son microenvironnement.

L'évolution de la neurobiologie, de l'immuno-hématologie et de la cancérologie a été considérable ces dernières années. Sorties de l'ère phénoménologique puis de l'ère réductionniste, ces disciplines sont entrées dans celle de l'intégration. L'expérimentation reste centrée sur la cellule mais intégrée dans l'organisme, structurée en système, lui-même en interaction permanente avec les autres grands systèmes. Le spectre de ces disciplines va des données les plus structurales aux données les plus physiologiques et physiopathologiques.

Ces définitions étant posées, les membres de la section 24 ont identifié quelques thèmes

de recherche et les approches méthodologiques qui leur semblent importants pour les années à venir.

## 1 – ÉVOLUTION DES THÉMATIQUES

L'évolution des connaissances a continué à un rythme très rapide tant au niveau moléculaire que cellulaire. Elle a conduit à renouveler profondément nos conceptions de l'organisation des molécules dans les cellules, et des cellules dans les réseaux (réseaux neuronaux, organes lymphoïdes, etc.). Le changement le plus sensible est le passage d'une analyse des molécules ou des cellules isolées les unes des autres, très réductrice, à l'étude des complexes moléculaires ou des systèmes, tissus et organismes, plus intégratrice. En effet, la cellule intègre de manière efficace de nombreux signaux, nécessitant des analyses quantitatives et interactives plus complexes couplées à des approches bioinformatiques. Une grande partie des découvertes majeures concerne la dynamique des interactions cellulaires dans les organes, ce qui est particulièrement marquant dans le cas des organes lymphoïdes, du système nerveux et des tumeurs. Par exemple, l'essor de la cyto-fluorimétrie a permis de montrer une diversité insoupçonnée des lignages cellulaires. Il est clair désormais que c'est de la régulation de l'organisation spatiotemporelle des molécules et des composants de la cellule que dépend la spécificité du traitement des signaux reçus et émis par les cellules. Le développement de ces concepts a conduit les chercheurs à modifier sensiblement leurs méthodes d'investigation. Il est maintenant indispensable d'étudier l'activité des molécules et des cellules *in situ*, dans les cellules elles-mêmes, au sein de réseaux cellulaires fonctionnels, voir dans l'organisme entier. Les méthodes d'analyse cellulaire d'imagerie et toutes les techniques afférentes connaissent un développement considérable, tout comme l'obtention et l'étude d'animaux

génétiquement modifiés (knock-out, knock-in, expression sélective d'une protéine dans un tissu ou organe). Un dernier groupe de méthodes se développe très vite, celles qui permettent d'analyser et de modéliser les interactions moléculaires de façon plus globale, telle l'essor des nouvelles techniques d'acquisition et de traitement des grandes quantités d'information (métadonnées) générées par les technologies actuelles. Pour les prochaines années, l'un des enjeux est de pouvoir prédire et intervenir sur le fonctionnement cellulaire au sein d'un système biologique intégré. Le défi est, comme toujours, autant conceptuel que méthodologique. Il s'agit de ré-introduire la dimension spatio-temporelle dans les investigations.

### 1.1 LA MISE EN PLACE DES RÉSEAUX MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES

La différenciation des tissus, la morphogénèse du système nerveux et la réponse immunitaire présentent de nombreux points communs : différenciation cellulaire en réponse à des signaux, migration de tout ou partie des cellules, constitution de réseaux cellulaires. Il faut souligner que ces signaux sont extraordinairement conservés au cours de l'évolution, et qu'ils sont étudiés dans un très large éventail d'espèces, des éponges à l'homme.

#### Signaux de différenciation et développement

Les bases moléculaires et cellulaires de la différenciation ont été clarifiées avec l'identification et le traçage des grands lignages cellulaires et des systèmes de signalisation particuliers qui sont mis en jeu dans la morphogénèse et la différenciation des organes. Des avancées importantes ont été réalisées dans l'étude des interactions entre gènes et entre gènes et environnement lors de la différenciation cellulaire, ainsi que dans celle des

mécanismes d'expression génique (remodelage chromatinien, facteurs de transcription, réarrangement des gènes, épigénétique et remodelage du génome). L'identification des cellules souches a ouvert des perspectives considérables dans le domaine de la thérapie génique ou cellulaire.

Ces résultats ont permis de classer de nombreux syndromes d'immunodéficience, d'états cancéreux (leucémies, lymphomes, etc.) et des maladies neurologiques. La différenciation cellulaire dépend de la mise en œuvre de programmes génétiques qui impliquent des réseaux de gènes plus ou moins spécifiques (gènes de différenciation comme les facteurs forkhead de la famille Foxo), régulés et coordonnés par des signaux extracellulaires et l'expression des régulateurs nouvellement découverts que sont les microARN. Ces phénomènes doivent être aussi coordonnés avec la sortie du cycle cellulaire et l'apoptose, dont le rôle est majeur au cours de l'embryogénèse. Ces étapes de régulation sont également celles dont le dysfonctionnement concourt à la transformation cancéreuse des cellules.

La mise en jeu de combinaisons spécifiques de régulateurs de l'expression génique (facteurs se fixant à l'ADN), est au cœur des mécanismes de mise en place des différents réseaux de communication cellulaire. La nature des signaux pouvant moduler l'expression génique est variée. Parmi les effecteurs extracellulaires, on peut compter les protéines solubles ou tissulaires, des acides nucléiques, des médiateurs lipidiques, des polymères osidiques, des ions. L'intégration des stimuli extérieurs par la cellule implique des voies de signalisation intracytoplasmiques et intranucléaires, le plus souvent en cascade, et aboutissent à l'activation de facteurs de transcription. Les sites de fixation de ces facteurs peuvent être différents (régions codantes, régions permettant la production d'ARN régulateurs, régions régulatrices intergéniques) et leur mode d'action varie selon la cible (expression ou répression de gène, production de micro-ARN, modification de l'état de condensation de la chromatine traduisant l'accessibi-

lité de régions chromosomiques). L'analyse de la perméabilité de la chromatine et de l'expression génique en fonction des diverses signalisations représente un nouvel enjeu défini sous le terme d'étude épigénétique.

### **Établissement des interactions cellulaires, des connexions**

Dans le système nerveux, l'établissement des contacts synaptiques nécessite en premier lieu la croissance et le guidage des neurites vers leurs cibles, mettant en jeu des molécules de guidance spécifique (telles que les sémaphorines, les nétrines, les éphrines, et les slits) et leurs récepteurs transmembranaires (plexin, DCC, EphR et Robo). De même, l'attraction des cellules immunitaires dans les organes lymphoïdes ou les tissus lésés met en jeu des couples de chimiokines et leurs récepteurs. D'une manière générale, dans un organisme, tout échange d'informations implique la rencontre des acteurs mis en jeu. Une deuxième étape est représentée par la stabilisation transitoire de l'interaction *via* des molécules de reconnaissance intercellulaire : l'interaction entre les molécules de la matrice extracellulaire et les molécules d'adhérence CAM (Cell Adhesion Molecules), la formation de plates-formes de signalisation, le recrutement des récepteurs des neurotransmetteurs, des cytokines et des facteurs de croissance. La troisième étape correspond à la dissociation et à la résolution de l'interaction conférant la dynamique du système.

Il est, de ce point de vue, tout à fait significatif d'observer que de nombreuses molécules que l'on pensait spécifiques, soit du système nerveux, soit du système immunitaire sont maintenant trouvées comme intervenant dans les deux systèmes, où elles contribuent aux mécanismes de reconnaissance entre cellules et à la formation des connexions synaptiques. La synapse immunologique et la synapse neuronale ne sont pas que des métaphores pédagogiques, mais bien l'expression d'une réalité biologique commune.

## 1.2 DYNAMIQUE DES RÉSEAUX MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES

La spécificité de la transmission des signaux repose sur l'organisation spatiale des molécules dans la cellule qui donne un sens à l'émission et la réception des signaux pour modifier le comportement cellulaire et élaborer les réponses appropriées au sein des réseaux et des systèmes cellulaires. Le neurone étant par excellence une cellule polarisée et fortement différenciée, la mise en place des assemblées moléculaires y prend un relief particulier, comme dans les synapses (pré et post-synapse), le segment initial de l'axone et les nœuds de Ranvier. La synapse immunologique formée par les cellules présentatrices de l'antigène et les cellules T est un autre exemple. Cette organisation n'est pas figée, bien au contraire. L'organisation synaptique et sa dynamique, le réaménagement des connexions en fonction de l'activité sont des phénomènes fondamentaux de la physiologie nerveuse et de la réponse immune.

### Propriétés élémentaires des molécules de signalisation

L'identification des propriétés élémentaires des canaux ioniques, des récepteurs, des transporteurs, des molécules d'adhérences, ou de toute autre molécule impliquée dans la signalisation intercellulaire, est toujours un champ d'investigation important. Cette thématique, à la frontière entre biologie structurale, pharmacologie et physiologie, bénéficie désormais des progrès des techniques de modélisation moléculaire, d'analyse structurale des protéines membranaires et des progrès de la mutagenèse. En particulier, le développement des techniques de biophysique (cristallographie, RMN du solide et en solution, spectroscopies optiques) appliquées aux protéines membranaires complexes permettent d'apporter une description moléculaire de leurs propriétés fonctionnelles (mécanismes d'activation, multiplicités conformationnelles associées à la sélec-

tivité de signalisation). Ces analyses ont permis de concevoir de nouveaux outils pour l'analyse fonctionnelle des cellules (sondes photoactivables) *in vivo*. Les recherches visent également à comprendre les propriétés des molécules de signalisation et la dynamique de leurs modifications (phosphorylation, glycosylation, ubiquitinylation, sumoylation, neddylation des protéines) pouvant réguler leurs interactions avec les autres partenaires.

### L'assemblage des molécules de signalisation

L'étude biochimique des récepteurs et des molécules de la signalisation intracellulaire a révélé l'extraordinaire multiplicité de combinaisons moléculaires qui conditionne la survenue d'une réponse cellulaire. Chaque récepteur, métabotrope ou ionotrope existe sous plusieurs formes moléculaires (gènes paralogues, variants d'épissage ou d'édition, etc.) et chaque récepteur peut être associé à plusieurs ensembles de molécules de signalisation. Par exemple, on ne compte pas moins de 12 protéines de signalisation associées aux facteurs de croissance de type PDGF, une fois activés. Cet assemblage moléculaire permet la propagation du signal biologique. Un excellent exemple concerne le mécanisme par lequel ces récepteurs activent la voie de signalisation Ras/MAP kinase de la membrane vers le noyau. Ces récepteurs à activité tyrosine kinase permettent le recrutement du complexe activateur SOS-Grb2 de la petite GTPase Ras du cytosol vers la membrane via une interaction directe de type SH2-pTry dépendant. De la même façon, les récepteurs métabotropiques comme les récepteurs tyrosine-kinase ou les récepteurs couplés aux protéines G sont associés à des protéines qui assurent leur localisation au sein des compartiments cellulaires et à d'autres protéines qui participent à des voies de signalisation intracellulaires, l'ensemble étant fortement compartimenté dans la cellule. La spécificité de ces réponses dépend principalement de la manière dont les récepteurs membranaires et les protéines de signalisation s'assemblent à la

synapse ou dans des microdomaines de la membrane des cellules, en partie grâce à des molécules d'échafaudage.

## **Dynamique moléculaire et cellulaire**

L'étude en temps réel de la formation des complexes moléculaires, la transmission des signaux et leur intégration en fonction du type cellulaire ou des compartiments subcellulaires va rester, sans aucun doute, l'un des axes forts des recherches pour les années qui viennent. La localisation et la composition des molécules qui composent les complexes moléculaires sont finement régulées. Les mécanismes appelés désensibilisation, séquestration, ou changement d'état conditionnent la manière dont une cellule est capable de recevoir et de répondre aux informations extérieures, en fonction de son histoire récente. Les interactions entre le cytosquelette, les compartiments vésiculaires et les molécules de la signalisation cellulaire ne sont que les différentes facettes d'un trafic moléculaire très complexe qui commence d'être finement analysé. Il est également étonnant de voir que la communication entre différentes voies d'activation outre ses effets synergiques peut mener à de nouveaux types de réponses cellulaires.

## **2 – POINTS SPÉCIFIQUES**

### **• Plasticité synaptique :**

– L'étude des protéines synaptiques membranaires doit dorénavant intégrer celle de leurs partenaires intracellulaires. Grâce aux données de ces 10 dernières années, nous pouvons aujourd'hui construire, de façon théorique, des échafaudages multimoléculaires synaptiques, mais leur dynamique d'assemblage, leur régulation et leurs fonctions demeurent très mal connues. Quels sont leurs rôles dans l'activité des récepteurs et des canaux, leur

adressage subcellulaire et leur signalisation? Couplent-ils plusieurs systèmes de signalisation intra- et inter-cellulaires? Sont-ils impliqués dans des maladies neurologiques? Nous devons répondre à ces questions, à l'aide des techniques adaptées (imagerie quantitative, FRET/BRET, approches peptidiques...etc..) dans le but de mieux comprendre le développement du cerveau, sa plasticité et ses pathologies.

– Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années sur les mécanismes qui sous-tendent la transmission synaptique rapide et sa plasticité dans le système nerveux central. Ainsi, au niveau post-synaptique, les récepteurs-canaux qui assurent la transduction du message chimique (neurotransmetteur) en message électrique sont maintenant connus à un niveau de détail sans précédent, notamment grâce à l'obtention des premières structures cristallographiques de ces protéines membranaires. Cela est vrai également pour les récepteurs aux neurotransmetteurs couplés aux protéines G. Une connaissance détaillée de l'architecture moléculaire et du mode de fonctionnement des récepteurs aux neurotransmetteurs est essentielle non seulement pour la compréhension en profondeur de la transmission synaptique mais ouvre également de nombreuses pistes pour le développement de nouveaux composés d'intérêt pharmacologique et thérapeutique. Outre l'importance de l'échafaudage sous-synaptique dans la localisation et la concentration des récepteurs à la synapse (cf paragraphe ci-dessus), l'implémentation de techniques de suivi de particules élémentaires en temps réel a également permis de révéler que les récepteurs synaptiques ne sont pas statiques à la synapse mais peuvent s'échanger rapidement entre les compartiments synaptiques, extra-synaptiques et intracellulaires. Des changements dans la proportion entre ces différents «pools» de récepteurs sont impliqués dans les phénomènes de plasticité synaptique à court et/ou long-terme, aboutissant au renforcement, ou au contraire à l'affaiblissement, de l'efficacité de la transmission synaptique. Les années récentes ont également été riches en avancées sur l'implication de mécanismes présynaptiques dans la

régulation de la communication neuronale : présence, plus large que supposée initialement, de récepteurs présynaptiques métabotropiques mais également ionotropiques (autorécepteurs) influençant la probabilité de libération, action de nouveaux messagers intercellulaires transynaptiques tels les endocannabinoïdes, possibilités de co-transmission multiples (glutamate/monoamine, glutamate/zinc, GABA/glycine) etc. Par ailleurs, grâce à la combinaison d'approches structurales, biophysiques, cellulaires et génétiques, la dissection des mécanismes d'exocytose aboutissant à la fusion vésiculaire et à la libération du neurotransmetteur dans la fente synaptique a fortement progressé. Toutefois, une description complète de la cascade d'événements allant de la détection de l'augmentation de calcium dans l'élément présynaptique à la fusion vésiculaire manque encore ; c'est là un des défis importants à relever dans le domaine pour les années à venir.

• **Interactions Neurone-Glie :** La place accordée aux cellules gliales dans la mise en place et la modulation de l'activité neuronale est en constante augmentation. De simple support veillant à l'homéostasie du milieu extracellulaire (notamment à travers leur rôle dans la barrière hémato-encéphalique), les astrocytes ont maintenant des fonctions clairement établies dans le développement du système nerveux, au cours duquel ils participent au guidage de la croissance neuritique et/ou de la migration des neurones. À travers l'expression de nombreux récepteurs aux neuromédiateurs, et la capacité de libérer certains de ces médiateurs (par un ou des mécanismes encore largement débattus), ils peuvent moduler l'activité neuronale, favoriser la synchronisation de l'activité de groupes de neurones et assurer un couplage neurovasculaire permettant d'adapter la circulation locale aux besoins énergétiques. C'est la découverte de ces fonctions qui a conduit à la notion de synapse tripartite. Ce concept pourrait encore être insuffisant, les précurseurs des oligodendrocytes (cellules NG2) et les cellules microgliales sont regardés par les neurobiologistes avec un œil nouveau, abandonnant progressivement leur statut de pourvoyeur de gaine de myéline

et de macrophages du système nerveux pour devenir des partenaires à part entière de la fonction synaptique. Si ce dernier aspect a connu un essor remarquable, c'est notamment grâce à l'émergence de techniques d'imagerie *in vitro* et *in vivo* de plus en plus performantes (voir développement technologique et instrumentation) et à la découverte que ces cellules (microgliales et NG2) expriment de nombreux récepteurs aux neuromédiateurs et influencent le développement et l'activité des neurones. Ceci devrait amener une meilleure compréhension de la mise en place des différentes structures du système nerveux central et de l'étiologie de maladies trouvant leurs origines dans des défauts développementaux (les récepteurs des différentes populations de cellules gliales peuvent être activés, voire désensibilisés, par des concentrations de différentes substances retrouvées dans la circulation au cours du développement fœtal). Un autre aspect particulièrement prometteur est la redéfinition du rôle des astrocytes dans la neuroénergétique : en plus de l'élégance de ces nouveaux concepts, ces travaux ouvrent la voie à une meilleure compréhension des données issues de l'imagerie cérébrale (IRM fonctionnelle).

• **Dysfonctionnements synaptiques :** On sait désormais que des dysfonctionnements de la mise en place des synapses ou de leur fonctionnement sont impliqués dans de nombreuses maladies neurologiques, neurodégénératives ou non. C'est le cas dans l'autisme, l'épilepsie, la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer par exemple. Dans certains cas, de tels dysfonctionnements synaptiques seraient à l'œuvre dès les étapes les plus précoces de la maladie. C'est pourquoi de nombreux laboratoires travaillant sur le fonctionnement synaptique se sont impliqués dans la recherche des dysfonctionnements synaptiques dans les diverses pathologies citées ci-dessus.

• **Neurogénèse, cellules souches et régénération :** Les cellules souches neurales sont des cellules indifférenciées que l'on trouve dans le cerveau tout au long de la vie. Elles persistent donc dans le cerveau adulte des Vertébrés. Par définition, elles sont capables

de donner naissance à des neurones ou à des cellules gliales par différenciation cellulaire, mais aussi se renouveler indéfiniment. Leur identification récente a provoqué un grand enthousiasme quant à la possibilité de leur utilisation afin de développer de nouvelles stratégies neurorégénératives. À l'inverse, elles peuvent être à l'origine de certains cancers. Le but des recherches actuelles est de mieux comprendre comment ces cellules intègrent les informations de l'environnement et quels sont les mécanismes cellulaires et moléculaires de leur différenciation.

### • Immunité innée et inflammation :

– Au cours des quatre dernières années, les études sur les cellules dendritiques se sont encore largement développées dans de nombreux laboratoires. Une attention particulière a été portée sur une meilleure caractérisation génomique et fonctionnelle des populations de cellules dendritiques chez l'homme et la souris. Les différences d'action et les nouvelles interactions entre cellules dendritiques myéloïdes et plasmacytoïdes ont été analysées et rapportées aux diverses situations pathologiques (défense infectieuse et anti-virale dont anti-HIV, auto-immunité, neuroinflammation, allergie, cancer). La dynamique des interactions entre cellules T et cellules dendritiques a été approfondie tant au cours des processus d'initiation de la réponse immune que des phases de régulation et de mise en place de tolérance. Les mécanismes intracellulaires conduisant à la « cross-présentation » et à l'activation sélective des lymphocytes T CD8 ont été précisément étudiés dans de nombreux modèles expérimentaux dont le cancer. Il a été plus spécifiquement souligné l'importance des TLR, des « scavenger receptors », des intégrines, des corps lipidiques, du processus protéolytique post-protéasome dans cette phase de réponse originale. De plus, le rôle des cellules dendritiques plasmacytoïdes (cellules qui ont une forte capacité à produire de nombreuses cytokines de l'immunité innée dont les interférons de type I) dans la régulation des réponses adaptatives a été largement étudié. Enfin, le développement de souris génétiquement modifiées a permis d'approfon-

dir nos connaissances des fonctions des populations de cellules dendritiques en situation physiologique et en conditions pathologiques.

– Plusieurs nouveaux acteurs cellulaires connus depuis longtemps, mais ignorés suite à des difficultés de manipulation ou d'accessibilité, ont récemment pris un nouvel essor comme acteurs de l'immunité innée. Ces derniers incluent les neutrophiles, les basophiles, les éosinophiles ou encore les mastocytes. Outre leur rôle de cellules sentinelles dans la défense immunitaire contre les pathogènes, de nombreux travaux récents montrent leur implication dans l'immunité et leurs propriétés immunorégulatrices. Ainsi le basophile a été reconnu comme acteur important de la différenciation des cellules T en cellules de type TH2 par sa capacité à produire des cytokines clés. Les mastocytes, initialement étudiés pour leur rôle dans l'allergie, représentent des intermédiaires importants dans l'orchestration des réponses inflammatoires et/ou immunitaires. Les neutrophiles ne sont pas seulement des phagocytes qui produisent des substances cytotoxiques, mais ils peuvent également avoir des rôles immunorégulateurs.

– La génération de lignées murines dites « Knockin » permettant une visualisation des populations cellulaires exprimant notamment le récepteur de chimiokine CX3CR1 ou la Langerin (CD207), a permis la caractérisation de nouvelles sous-populations monocytaires et dendritiques, respectivement. Elles ont rendu possibles des études de redistribution spatio-temporelle très précises et permis d'attribuer des fonctions spécifiques à ces nouvelles populations (angiogéniques, inflammatoires, « cross-présentatrices »).

• **Les cellules T pro-inflammatoires productrices d'IL-17:** Jusqu'à récemment, les lymphocytes T CD4<sup>+</sup> périphériques étaient répartis en trois grandes sous-populations. Premièrement, les cellules T CD4<sup>+</sup> Th1, caractérisées par leur capacité à produire de l'interféron gamma (IFN- $\gamma$ ), permettent l'activation des macrophages pour lutter contre les pathogènes intracellulaires et privilégient de ce fait une réponse immunitaire à médiation cellulaire. Deuxièmement, les cellules T CD4<sup>+</sup> Th2 carac-

térisées par leur production d'interleukine 4 (IL-4) délivrent un effet « helper » aux cellules B et induisent une réponse immunitaire à médiation humorale. Enfin, les cellules T régulatrices CD4<sup>+</sup> Foxp3<sup>+</sup> représentent une population cruciale pour le contrôle des réponses immunitaires et pour le maintien de la tolérance vis-à-vis du soi. Cependant, ce modèle a été récemment remis en question par la découverte d'une nouvelle population de lymphocytes T CD4<sup>+</sup> « helper », les lymphocytes T CD4<sup>+</sup> Th17. Ces cellules, générées par stimulation des cellules naïves en présence d'IL-6 et de TGFβ, se caractérisent par leur production importante d'IL-17 et représentent une lignée distincte des autres lymphocytes T CD4<sup>+</sup> périphériques. L'IL-17 joue un rôle important dans les réponses de types anti-microbiennes. En effet, elle représente un lien entre les systèmes immunitaires innés et adaptatifs en favorisant l'accumulation des granulocytes au niveau du site de l'inflammation. À l'inverse, l'IL-17 est également décrite comme étant fortement impliquée lors du développement de maladies auto-immunes telles que, la poly-arthrite rhumatoïde, la sclérose en plaques, les colites ou l'asthme. L'étude des lymphocytes T producteurs d'IL-17 est donc naturellement un enjeu d'importance. Récemment, d'autres sous-populations de lymphocytes T (cellules Tγδ et lymphocytes T-NK) ont pu également être identifiées comme de potentielles sources d'IL-17 *in vivo*.

#### • Les cellules régulatrices :

– Récemment, les avancées dans l'identification des sous-populations de lymphocytes T et l'utilisation de souris génétiquement modifiées ont permis de relancer le concept des cellules T régulatrices. Ce concept, en association avec les mécanismes de délétion et d'anergie, permet d'expliquer le maintien de la tolérance périphérique vis-à-vis du soi et le contrôle des réponses immunes contre les agents pathogènes. Plusieurs types de cellules T régulatrices ont été décrites parmi lesquelles les cellules T CD4<sup>+</sup> Foxp3<sup>+</sup> représentent la sous-population la plus importante en nombre absolu dans les organes lymphoïdes secondaires et la plus largement étudiée. Ces cellules sont soit générées dans le thymus (régulatrices naturelles), soit

issues de la différenciation de cellules T naïves à la périphérie (régulatrices induites). Les nombreux travaux récents disséquant les mécanismes permettant leur néo-génération *in vitro* ou leur expansion *ex vivo* laisse entrevoir la possibilité d'utiliser ces cellules dans des protocoles de thérapie cellulaire visant à prévenir ou à guérir les maladies auto-immunes.

– La redécouverte de cellules appelées dans les années 70 « suppressives naturelles » et aujourd'hui « myéloïdes suppressives » (MDSC, Myeloid-derived Suppressor Cells) fait l'objet d'une intense recherche, en particulier en immuno-oncologie. La présence de ces cellules myéloïdes immatures, précurseurs des cellules dendritiques, macrophages et granulocytes, a été retrouvée dans différentes situations inflammatoires (cancers, infections virales et bactériennes, auto-immunité, stress). Elles sont capables d'inhiber les réponses innées et adaptatives au cours de l'inflammation, et ainsi subvertir le système immunitaire. Les modes d'action des MDSC sont multiples comme, par exemple l'inhibition de l'activation et de la prolifération des lymphocytes T, le blocage de la différenciation des macrophages de type I, la régulation négative de la chaîne ζ du TCR ou de la molécule à tropisme lymphoïde CD62L, ou encore l'induction de cellules T régulatrices.

• **Vaccinologie :** Une part importante des projets des équipes d'Immunologie s'intéresse à la vaccinologie lymphocytaire T qui comprend soit la vaccination active par l'injection d'antigènes spécifiques seuls ou en association avec des cellules présentatrices, soit le transfert adoptif de cellules T activées *ex-vivo*. Ce type d'immunothérapie cellulaire est un objectif important dans le cadre des pathologies infectieuses et du cancer. Ce domaine a beaucoup bénéficié de l'amélioration des connaissances et des techniques d'évaluation de la qualité de la réponse immune.

• **Cancer :** les processus d'interactions cellulaires jouent des rôles essentiels dans la formation des cancers chez l'homme. Un effort sans précédent est mené pour comprendre comment une cellule au sein d'un organisme acquiert des propriétés transformantes. Ceci se

traduit par la capacité d'une cellule à proliférer de manière incontrôlée dans un environnement inapproprié (croissance, survie, immortalisation, angiogénèse) conduisant à la formation d'une tumeur « primaire » au sein de l'organisme. À cela s'ajoute leur capacité à disséminer (migration, intra- et extra-vasion), pour coloniser des organes distants et former des métastases. Ces mécanismes sont initiés par des altérations génétiques et épigénétiques, appelées processus d'oncogenèse. Un des challenges actuels est de comprendre les mécanismes moléculaires associés à ces processus cellulaires, et ce, via le développement de modèles intégrés et d'analyses moléculaires à grande échelle. De manière intéressante, ces propriétés transformantes sont induites par la dérégulation de voies de signalisation cellulaires conduisant à ces processus de « cancérisation ». Le ciblage de ces voies impliquées est devenu l'une des stratégies prometteuses en oncologie. Elle est connue sous la dénomination de « thérapie ciblée ». L'un des meilleurs exemples est celui de l'imatinib/Glivec, un inhibiteur de l'oncoprotéine de fusion et tyrosine kinase Bcr-Abl, responsable de la formation des leucémies myéloïdes chroniques. Cet inhibiteur bloque la signalisation oncogénique induite par Bcr-Abl conduisant à une régression spectaculaire de la leucémogénèse chez les patients. De nouveaux acteurs de cette transformation cellulaire ont été largement étudiés ces dernières années et concernent l'interaction des cellules cancéreuses avec les cellules du stroma environnant et du système immunitaire. En effet, ces interactions cellulaires souvent activées par des processus d'inflammation jouent des rôles essentiels dans le développement optimal de la tumeur, dont la formation de métastases. L'identification des acteurs moléculaires régulant ces interactions est devenue un enjeu crucial en oncologie fondamentale et médicale.

• **Métabolisme et Cancer :** un aspect récemment découvert dans le domaine du cancer est le changement du métabolisme cellulaire induit au cours de la tumorigénèse et de divers syndromes métaboliques. En effet, les cellules cancéreuses présentent une consommation accrue de glucose, c'est ce qui a

permis grâce à l'utilisation d'un analogue du glucose le FDG de visualiser les tumeurs par tomographie à émission de positrons. La « reprogrammation métabolique » des cellules cancéreuses est actuellement très étudiée pour comprendre comment le changement du programme transcriptionnel couple aussi efficacement la machinerie de croissance cellulaire au métabolisme glucidique et lipidique. De nouvelles voies thérapeutiques anticancéreuses ciblent des enzymes du métabolisme et des facteurs de transcription, mais la faible spécificité des inhibiteurs reste un obstacle majeur. De plus, depuis l'observation d'O. Warburg, il est connu que des cellules cancéreuses sont capables de dégrader le glucose de façon anaérobie. Cela se traduit par une activité réduite des mitochondries, délétère pour le déclenchement de l'apoptose et de la réponse immunitaire. La réactivation des mitochondries est aussi une option thérapeutique à suivre.

### 3 – DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE ET INSTRUMENTATION

La réflexion menée ici concerne les développements méthodologiques et instrumentaux récents qui ont considérablement modifié les questions posées et qui sont souvent moteur dans l'évolution des thématiques. Par exemple :

– Les méthodes de modification génique par perte ou gain de fonctions inductible et tissu spécifique sont en plein essor. Le défi est de pouvoir utiliser ces techniques de manière plus souple et plus rapide. Cet essor pose des problèmes de logistique au sein des animaleries, loin d'être résolu. De plus, des banques de ressources seront de plus en plus nécessaires (congélation d'embryons, cellulothèques, etc.). Le développement de nouveaux modèles animaux plus souples serait une alternative possible.

– De nouvelles méthodes d’invalidation génique utilisables *in vivo* se sont développées : interférence par les ARN ou vecteurs viraux. Ces méthodologies devraient permettre l’étude ciblée de la fonction des gènes et de leurs produits à l’échelle de l’organisme.

– Les méthodes d’analyse principalement basées sur l’imagerie dynamique ont permis d’identifier de nouvelles structures et fonctions cellulaires. Un important effort a été fait dans le développement des moyens de quantification de ces signaux.

– De nombreuses méthodes d’imagerie photonique ont été développées (ou adaptées des méthodes de microscopie classique) dans le but de réaliser des observations chez l’animal vivant. Parmi les moyens d’imagerie du petit animal, on peut citer : l’épifluorescence sur l’animal entier ou sur une portion de l’animal (cette technique appelée microscopie intravitale a été sensiblement améliorée par le développement de l’imagerie multiphotonique) ; l’imagerie à l’aide de sondes fluorescentes utilisables *in vivo* ; l’imagerie par bioluminescence pour la détection de gènes rapporteurs « luciférase » ; l’acquisition d’images en 3 dimensions par tomographie de fluorescence moléculaire (FMT) ou encore la microscopie confocale par fibre optique qui combine les méthodes d’exploration endoscopique à la résolution microscopique. Pour les animaux ou des objets transparents (*C. elegans*, Poisson zèbre, etc.), la mise en place de la LSFM (Light sheet based Fluorescence microscopy) permet de diminuer considérablement la photo-toxicité liée à l’illumination.

– La lumière est également devenue un outil de stimulation. En effet, diverses molécules ou ions « cagés » (glutamate, GABA,  $Ca^{2+}$ ...) peuvent être libérés sous forme active suite à l’absorption de photons. Ce domaine est en développement actif, avec une recherche de nouveaux composés cagés et/ou de composés pouvant être décaqués à travers des illuminations multi-photons, afin de favoriser leur utilisation *in vivo*. Un autre domaine en pleine expansion est l’optogénétique : l’expression ciblée de canaux ou de pompes ioniques photoactivables (channelrhodopsin 2, halorho-

dopsin) permet un contrôle non invasif de l’activité neuronale avec une grande précision à la fois spatiale et temporelle, aussi bien *in vitro* qu’*in vivo*. L’expression de ces protéines par infection virale, électroporation ou transgénèse, éventuellement sous la dépendance de promoteurs spécifiques de sous-populations neuronales ou nécessitant l’expression d’une recombinase, permet d’imposer à une population neuronale des patrons d’activité dans une gamme de 0 à au moins 30 Hz, ou de faire une cartographie des entrées synaptiques d’une structure. Les possibilités offertes tant par l’optogénétique que par le décaageage de molécules se voient encore augmentées par le développement de méthodes de modulation spatiale de la lumière comme l’holographie.

– À l’échelle moléculaire, la microscopie de force atomique (AFM) en milieu liquide offre la perspective d’étudier la dynamique des complexes macromoléculaires (par exemple les complexes nucléoprotéiques) pour en caractériser les propriétés cinétiques dans des conditions se rapprochant du contexte physiologique cellulaire. Des méthodes utilisant les propriétés de fluorescence de molécules uniques sont également en développement. Par exemple, on peut citer les Quantum-dots et le suivi de particule unique, la spectroscopie à corrélation de fluorescence (FCS) qui permet d’étudier des processus dynamiques de molécules marquées et l’imagerie par durée de vie de fluorescence (FLIM) qui autorise l’étude des interactions protéine-protéine à l’aide de couples donneur-accepteur en transfert d’énergie de fluorescence (FRET). Une des avancées majeures des dernières années est sans nul doute l’application à la biologie de l’imagerie fluorescente à super résolution permettant d’imager des cellules et des tissus avec une résolution inférieure aux limites de diffraction optique. Ces méthodes basées soit sur une amélioration de l’imagerie confocale (STED), soit sur l’utilisation de molécules à fluorescence limitée (PALM/STORM) ont permis de visualiser les cellules avec une précision jamais égalée (de l’ordre de 10 nm). Enfin, l’utilisation des ondes évanescentes (TIRF) a aussi permis de visualiser spécifiquement les mécanismes se déroulant au voisinage de la membrane plasmique.

– L'utilisation de la Cytométrie en flux s'est élargie au cours des dix dernières années, en partie grâce à l'amélioration des instruments sur la rapidité d'acquisition des échantillons, la convivialité des logiciels d'analyse et la possibilité de réaliser des marquages multiparamétriques (jusqu'à 19 paramètres évalués simultanément à l'échelle cellulaire aussi bien au niveau phénotypique que fonctionnel). De même, les techniques de dosage de la production de facteurs solubles multiples sur billes a beaucoup facilité l'étude à grande échelle de la communication cellulaire.

– L'utilisation croissante de méthodes « omiques », comme les analyses de transcriptome (par séquençage à haut-débit), les données génétiques issues de patients ou de lignées tumorales, les données de phénotypage d'animaux génétiquement modifiés, les patrons d'expression de gènes obtenus par hybridation *in situ*, entraîne une augmentation exponentielle du nombre de données à analyser, non seulement séparément, mais surtout à croiser entre elles pour pouvoir en tirer le meilleur parti. Le recoupement des données produites indépendamment devra permettre à la fois de reconstituer des réseaux de régulation et de pouvoir anticiper le fonctionnement de ces réseaux par l'utilisation de techniques de modélisation. Afin de faciliter le partage des données et des analyses combinant des données acquises dans des centres et/ou des périodes différents, il est important de promouvoir des standards d'acquisition et d'annotation des données, et le maintien de bases de données avec un haut niveau de contrôle qualité. Cet effort est à développer en concertation au moins à l'échelle européenne (EMBL-EBI, Genepaint, Europhenome...) en soutenant et en valorisant pour les chercheurs l'alimentation des bases de données.

Dans le domaine des méthodes optiques, les physiciens, les chimistes et les informaticiens ont joué et continueront à jouer un rôle important dans le développement de nouvelles approches et outils pour la biologie. Certaines des techniques évoquées ci-dessus ont entraîné le renforcement de la notion de plates-formes et leur mise en réseau.

## 4 – CONCLUSIONS

Vers plus de quantification, d'intégration, de régulation et de moyens d'intervention? L'intégration augmente à tous les niveaux d'étude mais en ce qui concerne le domaine des interactions cellulaires, on peut citer quelques applications majeures: régulation génique à grande échelle lors de la mise en place des fonctions cellulaires (transcriptome, protéome), analyse de fonctions cellulaires à l'échelle de populations, suivi dynamique dans le temps (résolution temporelle de plus en plus fine) ou l'espace (imagerie du petit animal, imagerie intra-vitale), intégration des fonctions des cellules au sein de l'organisme (interface entre l'immunologie, la microbiologie, l'endocrinologie, la neurologie notamment justifiant parfaitement le format de la section 24). Si les deux premiers niveaux d'étude sont surtout affectés par des phases de développement méthodologique, le dernier niveau repose plus sur l'émergence de nouveaux concepts: identité de fonctions cellulaires et moléculaires entre les différents modèles d'étude (fonction des cytokines dans le cerveau, interactions entre métabolisme lipidique et inflammation, rôle des neuromédiateurs ou des canaux ioniques sur les fonctions lymphocytaires, etc.), analyse de nouveaux modes d'interaction inter-systèmes (lignages cellulaires communs: macrophage et ostéoclaste, microglie; re-programmation cellulaire; rôle du système immunitaire dans les pathologies neurodégénératives).

## 5 – COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Les études des interactions cellulaires ont évolué au cours des dix dernières années et nécessitent actuellement le développement de modèles animaux pour tester la validité de ce qui a été démontré dans des études *in vitro* et *ex vivo*, et pour analyser dans des conditions

physiologiques l'effet des mutations activatrices ou inactivatrices des voies de signalisation mises en jeu lors des interactions cellulaires. De même, ces modèles sont un préalable pour toutes les approches physiopathologiques liées aux dysfonctionnements des interactions et des communications intercellulaires, que ce soit en immunologie, en neurologie, en endocrinologie et en cancérologie. Il semble que la France ait pris un retard certain dans le développement d'animalerie de qualité (tant en termes d'infrastructures que du personnel dédié à leur bon fonctionnement).

• **La section 24 à la croisée du fondamental et du physiopathologique :** De par les thèmes qu'elle couvre, la section 24 aborde la grande majorité des pathologies du XXI<sup>e</sup> siècle, à savoir les déficits cognitifs et les maladies neurodégénératives, les troubles immunitaires et l'allergie, et les différentes

formes de cancer. Les pressions politiques, la baisse des financements récurrents alloués aux laboratoires, et l'instauration d'une évaluation jugeant plus la rentabilité en termes de publications que la génération d'idées et de concepts nouveaux ont forcé une majorité des équipes à orienter leurs travaux vers une recherche plus appliquée aux résultats plus rapides mais moins ambitieux. Bien que la recherche translationnelle (de la paillasse au lit du patient) représente un maillon crucial de la recherche médicale, elle ne peut aboutir que si ces fondations reposent sur une recherche fondamentale de qualité basée sur des projets à long terme permettant de formuler des hypothèses nouvelles. La section 24 affirme donc la nécessité de maintenir une recherche fondamentale indépendante et de qualité dans l'espace de liberté qui lui est nécessaire et que représente en France le CNRS.

# PHYSIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET INTÉGRATIVE

*Présidente*

Marie-France BADER

*Membres de la section*

Isabelle BARO

Frédéric BOUILLAUD

Marcel CREST

Claude DELCAYRE

Barbara DEMENEIX

Daniel HENRION

Éric HONORÉ

Mohamed JABER

Philippe KACHIDIAN

Bertrand LAMBOLEZ

Clément LÉNA

Carina PRIP-BUUS

Damien ROUSSEL

Martial RUAT

Dominique SIGAUDDO-ROUSSEL

Caroline STRUBE

Nathalie TURQUE

## 1 – INTRODUCTION

Ce qui distingue la physiologie des autres disciplines qui en sont dérivées, c'est l'emphase sur l'étude des fonctions vitales à tous les niveaux de complexité de l'organisme. Dans cette optique, on peut partir du niveau moléculaire pour remonter à l'organisme tout entier en passant par la cellule, les différents tissus, les différents organes et les grands systèmes. On peut tout aussi bien faire la démarche inverse, partir d'une fonction et rechercher les explications au niveau moléculaire. La démarche essentielle est donc de toujours considérer la signification d'un mécanisme en relation avec l'intégrité du sujet. Pour accomplir ce programme, il faut donc faire appel à plusieurs niveaux d'analyse afin d'intégrer l'information recueillie pour comprendre l'organisme vivant.

La démarche physiologique est bi-directionnelle. Dans une démarche **descendante**, elle va de la fonction jusqu'à l'étage tissulaire puis cellulaire voire moléculaire. Cette approche descend les niveaux d'intégration pour essayer de démonter le système pièce par pièce. Auparavant, on ciblait une ou deux protéines (ou gènes) supposées être impliquées dans la fonction d'intérêt et on observait leurs modifications. Aujourd'hui on se propose de cribler des centaines voire des milliers de gènes sans à priori (hypothesis-free) lors d'une perturbation fonctionnelle. Cette stratégie est

*Ce rapport est une actualisation du rapport réalisé en 2006*

censée dépasser la vision réductionniste en répertoriant tous les gènes altérés dans une condition particulière. Elle pourrait s'avérer fructueuse si on s'intéresse à un organe ou à une cellule spécialisée mais elle n'est pas sans limites. En particulier, c'est la perturbation fonctionnelle qui provoque (cause) des modifications d'expressions de gènes et non l'inverse. Par ailleurs, la perturbation fonctionnelle agit sur un organisme entier et produit de multiples effets directs et indirects.

Les développements de la génétique et surtout du décryptage systématique du génome des organismes animaux ont permis l'émergence d'une démarche physiologique **ascendante**, c'est-à-dire allant du gène ou plus exactement du ou des produits du gène à la fonction. De la fonction d'un gène (qui n'est rappelons le que de servir à la synthèse protéique), on opère un glissement sémantique vers la fonction physiologique qui ne se situe pas forcément au même niveau d'intégration et qui ne procède pas forcément de la même logique. Sachant que sur les 28 000 à 30 000 gènes identifiés dans le génome humain, beaucoup d'entre eux ont des fonctions encore inconnues, l'ampleur de la tâche est facile à mesurer.

La physiologie bénéficie pleinement des progrès dans le décryptage du génome et dans la caractérisation moléculaire de chacune des protéines qui constituent l'expression de ce génome. Elle a déjà révélé les limites du raisonnement linéaire : un gène, une protéine, une fonction. Un gène peut souvent coder pour plusieurs protéines différentes, ne serait-ce que par le jeu de l'épissage alternatif. Une même protéine peut avoir plusieurs fonctions extrêmement différentes, au sein même d'un type cellulaire donné ou selon le tissu. De plus, plusieurs protéines différentes peuvent jouer le même rôle ou remplir la même fonction. Enfin une fonction biologique n'est jamais remplie par une protéine isolée, mais par des ensembles macromoléculaires impliquant souvent des structures lipidiques et des complexes protéiques, le tout organisé en structures tridimensionnelles, par des ensembles cellulaires hiérarchisés au sein d'un organe, par des inter-

actions entre plusieurs organes, voire par des organismes en interaction entre eux et avec leur environnement. Peut-être que le fait d'avoir attribué un rôle et un nom « fonctionnel » aux gènes et aux protéines au fur et à mesure de leur découverte (PAX6 qui était au départ décrit comme le gène spécifique responsable de la formation des yeux, s'exprime chez les animaux sans yeux et a également un lien avec la formation des tentacules chez le calmar ou le développement du système olfactif chez l'amphoxius) a fonctionné un peu comme un piège sémantique.

La modification phénotypique d'un animal modifié génétiquement est donc le résultat d'un nombre important de phénomènes cellulaires (effet pléiotropique des gènes, polygénie, épistasie, épissage alternatif des transcrits d'ARNm, par variation des sites de début et fin de translation, phénomènes compensatoires etc.) parfois sans rapport direct avec la fonction étudiée même si celle-ci est finalement modifiée. Il est intéressant de voir que l'altération des fonctions vitales (respiration ou ingestion) est souvent l'explication qui est donnée pour rendre compte de la mort précoce de la plupart des animaux knock-out. Si l'établissement de ces chimères a quelquefois permis de répondre clairement à la question posée au départ, il a souvent révélé de nouvelles fonctions pour certaines protéines, de nouveaux partenaires d'une fonction déterminée, et de nouvelles fonctions ou interactions entre fonctions. Cette organisation architecturale et ces interactions définissent ce que l'on appelle la biocomplexité, pour désigner le fait qu'un ensemble fonctionnel ne peut se réduire à la somme des parties qui le composent.

La spécificité de l'approche physiologique est de prendre en compte cette complexité afin de fournir les outils conceptuels indispensables à l'avancée des connaissances sur les fonctions du vivant. Dans le contexte de ce qui précède, la physiologie peut être définie comme la composante de la biologie qui étudie les mécanismes mis en jeu dans une fonction donnée, leur dynamique, leur régulation et leur adaptation aux contraintes internes et externes.

L'étude des fonctions fait appel à des approches expérimentales – qualifiées parfois d'explorations fonctionnelles – à tous les niveaux d'organisation du vivant. Dans ce contexte, les concepts, les outils et les savoir-faire en exploration fonctionnelle deviennent de plus en plus recherchés par les autres disciplines de la biologie. Si les physiologistes ont su assimiler les principaux concepts et méthodes de la biologie moléculaire et de la génétique, l'inverse n'est pas vrai. Il est rare que nos collègues généticiens ou biologistes cellulaires possèdent une connaissance intégrée des fonctions et de leurs adaptations. Cela place les chercheurs de la Section 25 en situation idéale pour relever les défis de la biologie post-génomique. Cet aspect n'est pas suffisamment pris en compte dans la définition des actions incitatives. Nous souhaitons par exemple que cette expertise de la Section soit prise en compte dans la structuration de plateformes d'exploration fonctionnelle au niveau national et des commissions interdisciplinaires. La physiologie a permis la création d'autres disciplines qui sont maintenant devenues des secteurs scientifiques à part entière et sont représentées par d'autres sections. En ce sens, les échanges réciproques entre notre section et les autres apparaissent souhaitables et ne sont que le prolongement d'une longue histoire. Toutefois, la démarche physiologique ne doit pas seulement importer des techniques et des concepts d'autres secteurs. Elle doit contribuer à réintégrer les données pertinentes dans le cadre d'une vision plus globale du fonctionnement du vivant.

Comme pour l'ensemble des sciences expérimentales, les connaissances en physiologie s'élaborent à partir de modèles et d'outils. Structurée par l'approche réductionniste, la physiologie a développé des modèles simplifiés permettant de séparer les systèmes étudiés en sous-systèmes plus facilement analysables. Si l'énorme accumulation des connaissances souligne l'efficacité d'une telle approche, elle ne saurait obérer le nécessaire regard critique qui doit être porté sur les résultats issus de telles approches. Se pose en effet la question de la vraisemblance dans le contexte d'un organisme vivant et agissant dans son éco-

système. Pour cela, et à côté des modèles cellulaires, la place de modèles plus intégrés doit être confortée, au travers du recours aux approches *in vivo*.

En ce qui concerne l'approche méthodologique, la physiologie a su depuis longtemps forger ses propres outils, spécifiques de chaque niveau d'étude et/ou de chaque fonction. Elle a intégré et adapté les outils fournis par les autres disciplines telles que l'informatique, l'optique, la statistique, les mathématiques, la physique et bien sûr la chimie. Cependant, si les techniques importées d'autres secteurs disciplinaires ont permis de faire progresser les connaissances, elles ont aussi eu tendance à structurer les interprétations dans un sens souvent mécaniste, au mépris de la biocomplexité déjà évoquée.

Afin de déterminer, pour l'accomplissement d'une fonction donnée, les partenaires impliqués, leur organisation, leurs caractéristiques fonctionnelles et la dynamique de leurs interactions, la physiologie a volontiers recours à l'étude des conséquences de perturbations spontanées (la pathologie) ou volontaires dans le système biologique considéré. La liste des perturbateurs possibles va des modifications contrôlées de l'environnement à l'administration d'agents pharmacologiques. Les nouveaux outils issus de la biologie moléculaire et du post-génome fournissent des moyens d'intervention beaucoup plus sélectifs tant dans le choix de la cible que dans la fixation de la durée de la perturbation. Certes la connaissance des gènes et des protéines associées autorisent l'interaction avec les caractères phénotypiques et pourraient donc ouvrir des pistes intéressantes pour développer des modèles animaux de pathologies humaines. Cependant nous n'avons pas une compréhension réelle des phénomènes sous-jacents en tout cas pas dans le cadre linéaire que sous-tend la notion idéalisée de programme génétique. La construction d'animaux chimériques s'apparente plus à du bricolage de haut vol (nécessitant de la technicité, de nombreux essais et un peu de chance) qu'à une expérimentation censée nous éclairer sur le fonctionnement du génome. Disposer d'animaux

présentant des symptômes similaires à une pathologie donnée peut s'envisager dans une perspective thérapeutique voire industrielle (avec les réserves sur la transposition à l'homme qui n'est pas un rongeur) mais on ne peut réduire la recherche à cette seule dimension. Par ailleurs, l'étude des pathologies ne donneront pas forcément des indications sur le fonctionnement normal d'un organisme.

En ce qui concerne les espèces étudiées, la souris représente sans nul doute le modèle de choix, eu égard à l'importance des outils génétiques disponibles dans cette espèce. Contrairement à une croyance bien ancrée, ce n'est cependant pas la seule espèce qui permette le passage de la génomique fonctionnelle à la physiologie. La surexpression de gènes ou leur délétion sont appelées à devenir de plus en plus abordables sur d'autres espèces, ce qui devrait permettre aux physiologistes de ne pas avoir à abandonner leur espèce favorite pour l'étude d'une fonction donnée (le rat par exemple pour l'étude du fonctionnement cérébral ou des fonctions cardio-vasculaires, le mouton ou le hamster pour l'étude de la rythmicité saisonnière des fonctions, etc.). Ainsi, le séquençage du génome de plusieurs espèces animales (*Xenopus tropicalis*, poisson zèbre, poulet) ouvre des possibilités importantes pour des analyses comparées des fonctions régulatrices et des interactions entre voies de signalisation et régulations transcriptionnelles.

## 2 – LES RÉSULTATS MARQUANTS DE CES DERNIÈRES ANNÉES

### 2.1 PHYSIOLOGIE ÉVOLUTIVE, MISE EN PLACE D'UNE FONCTION

La physiologie est née comparée. Ses débuts ont reposé sur l'utilisation de nombreux

modèles animaux adaptés aux questions physiologiques posées (le calmar ou l'aplysie et la transmission de l'influx nerveux, le chat et le cortex visuel, le chien et le réflexe conditionnel ou le canard et l'influence de la lumière sur la reproduction...). Les grandes fonctions physiologiques et un très grand nombre des acteurs de ces fonctions ont ainsi été découverts en exploitant la diversité dans l'unité du vivant. Le développement de la biologie moléculaire a entraîné une modification de l'approche physiologique qui s'est tournée vers la compréhension des mécanismes fins de régulation des gènes impliqués et enfin accessibles. Le décryptage de ces mécanismes nécessitait la mise au point de nombreux outils moléculaires. Par conséquent, faute de pouvoir développer ces multiples outils chez autant d'espèces, le nombre de modèles animaux exploités en physiologie s'est petit à petit réduit. De nouveaux modèles sont cependant apparus ces dernières années, choisis en partie pour leur position phylogénétique dans l'arbre du vivant, même si des considérations comme la taille réduite du génome ont été déterminantes (*Caenorhabditis*, *Ciona* ou *Tetraodon*). Le séquençage du génome de ces animaux rend ainsi plus aisée la constitution des outils appropriés et permet de reconsidérer l'approche comparative et évolutive de la physiologie, ainsi que la physiologie adaptative et environnementale.

L'analyse comparée des génomes a permis de mettre en évidence des caractéristiques inattendues dans les mécanismes de régulation des gènes qui peuvent profiter à de nombreuses disciplines des sciences du vivant dont la physiologie. Il est apparu en effet que la complexité du fonctionnement du vivant reposait non pas sur le nombre de gènes constitutifs du génome mais sur la complexité des systèmes de régulations (promoteurs alternatifs avec leurs propres éléments régulateurs, micro-ARN, régulations épigénétiques, épisages alternatifs générant des produits de gènes variant d'un tissu à l'autre ou avec l'état physiologique). Par ailleurs, l'analyse comparée des génomes a montré que les séquences les mieux conservées entre espèces distantes sur le plan phylogénétique étaient non pas les séquences codantes mais les sites de fixa-

tion de facteurs de régulation transcriptionnelle. Ceci a permis de développer de nouveaux et performants outils d'identification de régions régulatrices, sur la base d'analyses comparées à l'aide de modèles dont la distance phylogénétique est choisie d'autant plus grande que les modalités de la régulation concernée sont conservées. Ces approches ont également permis de constater que de nombreux gènes co-régulés (des syn-expression groupes) possèdent des modules régulateurs communs composés de deux ou trois (voire plus) éléments de réponses (sites de fixation) pour des facteurs de transcription communs. La comparaison de nombreux génomes plus ou moins distants permet d'examiner la conservation ou non de ces éléments non-codants. Couplée à des analyses fonctionnelles, la signification physiologique de tels modules régulateurs/ intégrateurs transcriptionnels peut être déterminée.

Les derniers résultats obtenus grâce aux développements technologiques, telles les analyses de génomes entiers, introduisent le concept d'usines transcriptionnelles intra- et interchromosomales permettant l'intégration de plusieurs voies de signalisation. L'exploitation de modèles de physiologie comparée, soit avec des génomes simplifiés, soit avec des tissus permettant l'obtention de nombreuses cellules homogènes dans un état déterminé, facilitera le passage de l'emploi de ces techniques pour l'heure destinées essentiellement à des études *in vitro*, à des modèles *in vivo* permettant ainsi d'aborder des questions d'ordre physiologique.

En plus de ces aspects mécanistiques, la comparaison des fonctions de régulation et des acteurs mis en jeu entre groupes taxonomiques plus ou moins distants permet d'aborder l'analyse physiologique de façon différente. Les grandes fonctions physiologiques qui sont apparues au cours de l'évolution des groupes taxonomiques, ont été conservées ou non et se sont complexifiées en fonction des contraintes environnementales ou intrinsèques. Prenons l'exemple, du contrôle hypothalamique de la fonction thyroïdienne (stimulation du métabolisme cellulaire et du développement tardif).

Dans tous les groupes de vertébrés à l'exception des mammifères, celui-ci est assuré par le CRF, facteur stimulant l'axe corticotrope, l'axe du stress. Chez les mammifères, ce contrôle est exercé principalement par un autre facteur hypothalamique, peu spécifique ailleurs, la TRH. Pourquoi la TRH a-t-elle pris le relais du CRF exclusivement chez les mammifères, mériterait d'être exploré. Cette caractéristique permet cependant d'analyser les interactions entre l'axe du stress et l'axe thyroïdienne des mammifères sous un autre angle, ouvrant même sur les interactions complexes entre grands systèmes régulateurs tel le système immunitaire et les systèmes neuroendocriniens.

Ainsi, le contexte est devenu favorable au redéploiement de la physiologie comparative et évolutive. Le CNRS est, en France, le seul organisme de recherche où il est pleinement légitime d'afficher cette discipline dans ses missions. Il s'agit avant tout d'ouvrir l'éventail des retombées de la physiologie évolutive dans l'ère post-génomique, d'exploiter nos connaissances actuelles avec des approches de modélisation et de la biologie des systèmes, afin de contribuer à mieux comprendre le vivant dans son ensemble et sa diversité.

## 2.2 ÉNERGÉTIQUE, MÉTABOLISME, NUTRITION

L'activité des êtres vivants végétaux et animaux implique un flux constant d'énergie et l'homéostasie énergétique est une loi fondamentale en biologie. Les animaux tirent l'énergie de leur alimentation, et *in fine* des mécanismes moléculaires intracellulaires transforment l'énergie chimique d'oxydo-réduction des nutriments en une forme utilisable par les cellules vivantes : gradients ioniques ou molécules « riches en énergie » dont l'ATP. L'adaptation des entrées énergétiques aux besoins (gestation, allaitement, exercice physique...) ou de l'organisme à l'environnement (disponibilité et nature des nutriments, température, lumière, PO<sub>2</sub>...) ainsi que les mécanismes régu-

lateurs impliqués sont une préoccupation constante de la recherche en biologie. Depuis ces dernières années, son intérêt est stimulé entre autre par les effets néfastes (diabète, obésité, dyslipidémies, maladies cardiovasculaires) induits par un déséquilibre prise alimentaire/dépense énergétique couramment observé dans les sociétés développées. Cette constatation appelle trois remarques: 1) Ce domaine se trouve de fait sous la pression d'attentes sociétales fortes. Toute nouvelle découverte en ce domaine est immédiatement mise en relation avec ses applications possibles qui vont de la cosmétique à la prévention de la mortalité liée aux affections cardiovasculaires; 2) Il est nécessaire d'assurer une bonne gouvernance entre savoir et pouvoir pour se maintenir pour partie à l'écart de cette pression afin d'éviter la tentation de céder à des effets d'annonce déraisonnables. D'où la légitimité supplémentaire d'une physiologie fondamentale; 3) La qualité des données quantitatives est essentielle, car les différences ayant des conséquences physiopathologiques peuvent être d'amplitude modeste et opèrent dans le domaine de la normalité physiologique. De ce point de vue toute amélioration des méthodes quantitatives qu'elles soient expérimentales ou théoriques est un progrès.

Depuis plusieurs années, des recherches s'attachent à identifier les liens entre les métabolismes des divers tissus et types cellulaires. Il convient de signaler l'importance nouvelle des méthodes d'étude globale (« Omiques »). Celles-ci mettent souvent en évidence de façon inattendue des gènes du métabolisme dans des modèles physiopathologiques divers. Des avancées importantes ont été réalisées par des laboratoires relevant de la section permettant une compréhension croissante des mécanismes de la communication cellulaire et inter-organes en relation avec le métabolisme et la nutrition, et ceci dans des tissus périphériques aussi divers que le muscle squelettique, le foie, le cœur, le rein, le pancréas, l'intestin et les tissus adipeux. La mono-O-glycosylation des protéines constitue un nouveau mécanisme de régulation de l'activité des protéines, similaire à celle de la phosphorylation, qui est au carrefour entre métabolisme et régulation

de l'expression des gènes. Un autre concept en émergence est l'impact de la nature des lipides (saturé, monoinsaturé ou polyinsaturé) et de leur métabolisme sur le fonctionnement de la cellule et la communication cellulaire. Ce nouveau champ de recherche nécessite le développement de nouvelles approches d'exploration telle que la lipidomique et la métabolomique. Plusieurs avancées dans le domaine des pathologies nutritionnelles ont été obtenues. Le rapport entre inflammation et ces pathologies est un concept qui a émergé au cours des dernières années, concept dont certaines équipes de la section ont été à l'origine. On sait maintenant par exemple que les cytokines décrites à l'origine au sein du système immunitaire sont également présentes dans les tissus adipeux, le foie et le muscle squelettique dans lesquels elles interviennent à la fois sur les voies métaboliques (lipolyse, lipogenèse) et leur régulation (sensibilité à l'insuline) mais aussi sur le devenir de la cellule (prolifération, différenciation, apoptose).

Métabolisme et nutrition sont étroitement liés à l'énergétique et à l'organelle impliqué de manière prédominante: la mitochondrie. La section 25 a soutenu la création du GDR 3159 « MeetOchondrie » qui rassemble tous les acteurs de la recherche dans le domaine de la mitochondrie afin de promouvoir les échanges interdisciplinaires. La mitochondrie joue un rôle central dans le métabolisme et la physiologie, et leur dysfonctionnement est maintenant mis en cause dans un nombre toujours croissant de pathologies. Les mécanismes de fusion-fission du compartiment mitochondrial apparaissent impliqués dans des pathologies spécifiques. Leur rôle et celui de l'autophagie dans un processus de contrôle qualité du compartiment mitochondrial est évoqué. Bien qu'un déficit énergétique puisse être mis en cause, les travaux actuels proposent aussi une implication du stress oxydant résultant de l'action de radicaux oxygénés dont une partie provient des mitochondries. Des équipes de la section ont montré que les altérations microvasculaires survenant dans le diabète et l'obésité, aggravées par l'âge, provenaient en partie d'un excès de stress oxydant empêchant l'adaptation des artéioles à leur environne-

ment. En association avec des équipes d'autres sections (physique et chimie), ces mêmes équipes ont lancé un programme de recherche de substances végétales actives contre les perturbations métaboliques induites par le mode de nutrition occidental. Bien que ces travaux définissent les radicaux oxygénés comme néfastes, ces formes radicalaires sont depuis peu considérées aussi comme des indicateurs de l'état énergétique cellulaire et constituent un signal biologique impliqué dans diverses fonctions (sécrétion d'insuline par le pancréas, régulation de la prise alimentaire).

Le contrôle nerveux et systémique du métabolisme représente un sujet capital qui est par essence un sujet intégré car il associe la neurophysiologie, la neuroendocrinologie et la neurobiologie de la prise alimentaire, la microanatomie hypothalamique fonctionnelle, et la contribution de signaux périphériques essentiels tels les métabolites (glucose, acides gras, protéines), mais également des hormones (leptine et autres cytokines adipocytaires, GLP-1 et ghréline intestinale, insuline pancréatique) donc l'endocrinologie et le métabolisme. Il s'agit d'un vrai sujet de biologie et physiologie qui est en passe d'aboutir à la description des circuits neuronaux précis impliqués, la nature des signaux, les récepteurs et les voies de signalisation. La découverte d'un dialogue neuro-hormonal entre les réseaux neuronaux de différentes régions cérébrales (hypothalamus, tronc cérébral) et différents tissus périphériques (tissus adipeux, intestin, plus récemment foie, muscle, pancréas, systèmes immunitaires) a constitué une révolution importante dans les mécanismes mis en jeu dans la régulation du poids de l'individu. Un exemple est l'importance de la gluconéogenèse intestinale dans le « sensing » central du glucose et dans l'homéostasie énergétique. Les avancées majeures dans le domaine de la nutrition et de la physiologie métabolique sont l'identification de nouvelles hormones et de nouveaux récepteurs contrôlant la prise alimentaire et le poids corporel. Une partie des approches est également faite en utilisant des modèles plus simples (nématode, drosophile, poisson zèbre) par exemple.

Il convient de rester attentif au développement de nouvelles méthodologies et à l'introduction de nouveaux modèles. Par exemple l'utilisation des caméras à émission de positrons se révèle fructueuse dans le domaine du métabolisme avec notamment l'introduction de marqueurs d'oxydation des corps cétoniques complémentaires du classique fluorodeoxyglucose. L'introduction de modèles animaux nouveaux, et supposés plus représentatifs de certaines adaptations ou situations physiopathologiques, est à l'ordre du jour. Les données génétiques/protéomiques qui devraient devenir disponibles sur ces nouveaux modèles leur permettront de combler les lacunes liées à leur nouveauté et leur étude pourrait ainsi atteindre un niveau de résolution comparable à celui des organismes modèles plus classiques.

## 2.3 LES RYTHMES BIOLOGIQUES

La rythmicité biologique est une fonction qui permet aux organismes d'anticiper et de s'adapter aux contraintes cycliques auxquelles ils sont soumis. Elle permet l'occurrence des événements biologiques aux périodes les plus propices à leur bon fonctionnement, assurant ainsi une « homéostasie temporelle » indispensable à l'intégrité fonctionnelle des organismes. De nombreuses fonctions biologiques, du niveau moléculaire au niveau le plus intégré, se produisent selon une rythmicité précise et prédictible. Ainsi, la plupart des activités métaboliques et (neuro)endocrines, le sommeil, la reproduction, l'alimentation, l'activité générale, la régulation du poids corporel et, chez certaines espèces, l'hibernation et la migration, ont lieu à des périodes précises du cycle journalier et/ou saisonnier.

Ces dernières années, il a été démontré que certaines maladies (comme le cancer, la dépression, les troubles visuels ou l'autisme), des comportements ou contraintes sociales (travail en horaires décalés, voyages transmériques) ou des phénomènes liés à l'âge, entraînent des altérations des rythmes biologiques

qui induisent ou aggravent les troubles cliniques. En parallèle, la médecine commence à tenir compte de la sensibilité circadienne ou saisonnière des pathologies individuelles lors de l'application des traitements pharmacologiques (chronopharmacologie).

La rythmicité biologique requiert la présence d'horloges biologiques dont le fonctionnement est autonome mais dont l'activité en amont est synchronisée par différents facteurs et en aval transmet l'information temporelle au reste de l'organisme. Chez les mammifères, il existe une horloge centrale puissante localisée dans les noyaux suprachiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus. L'absence ou le dysfonctionnement de cette structure entraîne la perte de l'homéostasie temporelle d'un organisme. Les oscillations endogènes de cette horloge reposent sur des mécanismes moléculaires qui impliquent une dizaine de gènes appelés « gènes horloge » : *Per1*, *Per2*, *Per3*, *Clock*, *Bmal1*, *Cry1*, *Cry2*, *Rev-erba*, *Rorb*. Les travaux actuels conduisent à un modèle de rythmicité circadienne basée sur des rétrocontrôles positifs (*CLOCK/BMAL1*) et négatifs (*PER/CRY*) qui fonctionnent en boucle avec une périodicité proche de 24h (circa-dienne). L'activité endogène de cette horloge est synchronisée à 24h exactement par différents facteurs. Il s'agit en premier lieu de la lumière transmise par le tractus rétinohypothalamique, mais d'autres facteurs, en particulier la prise alimentaire, des facteurs sociaux, certaines drogues sont capables de synchroniser l'activité de l'horloge. Le message temporel construit dans les NSC est transmis à l'ensemble de l'organisme par un réseau d'efférences neuronales et de signaux neuroendocrines capables de synchroniser les fonctions biologiques. Parmi ces signaux, la mélatonine, hormone synthétisée par la glande pinéale, joue un rôle fondamental pour la synchronisation des fonctions saisonnières comme la reproduction.

Une découverte majeure de ces dernières années par des équipes de la Section est que de nombreuses régions du cerveau et des tissus non neuronaux à la périphérie contiennent également une horloge endogène. Le rôle exact de ces horloges « secondaires » n'est pas encore

bien connu. Elles jouent probablement un rôle important dans l'organisation temporelle des fonctions à l'échelle d'un organe et de l'organisme entier. Ce nouveau concept d'un système multi-oscillant a conduit à reconsidérer la notion de rythme biologique à la fois au niveau fondamental mais aussi clinique. Si l'horloge circadienne des NSC est toujours considérée comme le « chef d'orchestre » conduisant la rythmicité d'un organisme, il apparaît que les horloges secondaires forment des réseaux et dans certaines conditions peuvent fonctionner et être synchronisées de façon indépendante. En terme clinique, ce nouveau concept est important car il est maintenant certain que chez l'homme une désynchronisation endogène ou induite de certains éléments de ce système multi-oscillant perturbe l'intégrité fonctionnelle de l'organisme et conduit à des pathologies.

Le défi actuel dans le domaine des rythmes biologiques est d'exploiter les modèles génétiques générés ces dernières années (souris déficientes en un ou plusieurs gènes horloge, rat/souris gène horloge-luciférase) et d'établir des mutations conditionnelles (tissu et/ou stade spécifique) afin d'appréhender l'étendue de l'implication des systèmes de mesure du temps sur la physiologie d'un organisme, tout en continuant à tenir compte de la grande biodiversité des modèles étudiés.

## 2.4 TRAITEMENT ET INTÉGRATION DES INFORMATIONS NERVEUSES

Le système nerveux central des animaux permet non seulement l'intégration et la régulation des principales fonctions physiologiques en temps réel mais également en temps différé, au travers des capacités de perception et de représentation du monde environnant. Si la compréhension du fonctionnement du cerveau est souvent présentée comme la dernière frontière de la biologie, la physiologie, au sens où elle a été définie précédemment, est certainement la discipline de choix pour le passage de cette frontière. Elle est en effet la seule à pou-

voir prétendre faire le pont entre les différentes sous-disciplines constitutives des neurosciences, de la biologie moléculaire et cellulaire aux fonctions cognitives et comportementales. Les neurosciences dites intégrées se nourrissent des résultats des études les plus fondamentales sur les canaux ioniques, leur plasticité et leur dynamique de migration intracellulaire, les mécanismes moléculaires de la mort neuronale, les capacités de différenciation et de migration de nouveaux neurones, et les interactions entre les neurones et les différents éléments cellulaires constitutifs de la glie. La neurophysiologie inscrit ces éléments structuraux de base dans des circuits neuronaux, micro-circuits entre cellules adjacentes ou circuits macroscopiques révélés par les études de neuroanatomie et d'imagerie fonctionnelle, dont les propriétés émergentes déterminent plus directement la fonction. Cette intégration des problématiques de l'échelle moléculaire à celle des réseaux est ainsi nécessaire à la compréhension du fonctionnement des circuits neuronaux dans des conditions dites physiologiques, c'est-à-dire correspondant au fonctionnement de l'organisme animal dans son milieu.

Les travaux de la section reflètent cette intégration des échelles et déclinent l'étude fonctionnelle du système nerveux en chapitres, parfois interconnectés, tels que les déterminants de l'excitabilité et des modes de décharge des neurones, l'intégration et la plasticité synaptique dans ses aspects moléculaires et fonctionnels, la coordination de la décharge dans les réseaux centraux (synchronisation, oscillations, etc.), ou l'organisation de la connectivité fonctionnelle dans les réseaux. Ces travaux sont souvent corrélés à des aspects plus intégrés en documentant les corrélats comportementaux aux observations du fonctionnement des réseaux. Ainsi, les travaux menés reflètent de plus en plus fréquemment le caractère transverse de la physiologie, car ils combinent, dans la même étude, caractérisation *in vitro* et *in vivo*, outils comportementaux, pharmacologiques, moléculaires et génétiques. La neurophysiologie s'intéressant par définition aux propriétés émergentes d'un système complexe, elle fait de plus en plus appel à la modélisation, afin de tester le réa-

lisme des hypothèses mécanistiques issues des données expérimentales et de générer de nouvelles prédictions ; physiciens et mathématiciens sont intégrés aux équipes et participent ainsi activement à l'effort de compréhension de la fonction du système nerveux. En révélant de nouveaux mécanismes et processus, la neurophysiologie fondamentale ouvre également des pistes vers la thérapeutique.

Ainsi, la découverte récente d'un nouveau processus de plasticité cérébrale, la neurogenèse dans le cerveau adulte, a ouvert un nouveau pan de recherche. Les questions déterminantes dans cet axe visent par exemple à identifier les mécanismes qui contrôlent la prolifération, la différenciation, la migration ou encore l'apoptose de ces nouvelles cellules au sein de structures telles que l'hippocampe et la zone sous-ventriculaire des ventricules latéraux et le rôle de ces mécanismes dans les processus mnésiques par exemple. Les études dans ce domaine suggèrent que la neurogenèse adulte est impliquée dans la mémoire et l'apprentissage spatial notamment dans l'hippocampe ou encore la discrimination olfactive dans le bulbe olfactif. Les facteurs qui favorisent la survie et l'intégration des nouveaux neurones dans les circuits préexistants sont en cours d'identification. Ces travaux devraient permettre d'apprécier si l'effet thérapeutique de nombreuses molécules telles que les antidépresseurs ou les antipsychotiques résulte d'une action sur ces nouvelles cellules. La caractérisation des voies de signalisations impliquées dans ces processus devraient permettre le développement de nouvelles classes de molécules et donc autoriser la modulation pharmacologique de ces phénomènes avec des applications dans le traitement de différentes pathologies neurodégénératives.

La compréhension au niveau cellulaire et moléculaire du processus d'addiction est un autre exemple des axes stratégiques de la discipline : l'usage abusif de drogues agit à long terme sur le cerveau, en provoquant des adaptations cellulaires et moléculaires complexes, entre autres dans le système dopaminergique qui appartient au système de récompense du cerveau. Les bases moléculaires de l'adaptation

neuronale sous-tendant les mécanismes de l'addiction aux drogues restent à découvrir. Enfin, les pathologies neurodégénératives type Alzheimer ou Parkinson demeurent de vraies questions de santé publique, l'étude des processus de survie et de mort cellulaire neuronale, ainsi que les aspects biochimiques et génétiques impliqués dans le déclenchement de la pathologie constituent des enjeux cruciaux. Pour rester au niveau cellulaire, il convient de mentionner les récentes découvertes des rôles inattendus des cellules gliales, astrocytaires et des oligodendrocytes. En effet, leur rôle a longtemps été confiné au maintien de l'homéostasie dans le milieu cérébral. Récemment, des arguments expérimentaux sont venus étoffer nos connaissances : les cellules gliales pourraient jouer un rôle dans le contrôle de l'excitabilité neuronale, en constituant un système de transmission non-synaptique permettant de moduler les activités neuronales. Il reste à déterminer comment le réseau glial contribue aux grandes fonctions cérébrales. Enfin, la neurophysiologie ne peut se concevoir sans l'étude de l'interaction permanente entre les centres du système nerveux et leurs effecteurs. Il existe des liens indissociables entre les informations sensorielles, issues du milieu externe ou interne, le fonctionnement des centres et les organes qui reçoivent les réponses effectrices. La neurophysiologie est ainsi une discipline ouverte dont les frontières dépassent la stricte limite du tissu nerveux.

Le large spectre de questions que regroupe la neurophysiologie contemporaine nécessite la mise en œuvre de nombreuses approches expérimentales : l'utilisation d'animaux transgéniques et recombinants, les techniques d'imagerie cellulaire, de détection des transcrits dans des neurones uniques, les enregistrements neuronaux multiples chez l'animal pendant la tâche, le dialogue données-modèle théorique, font désormais partie des outils couramment utilisés. Mais les travaux de la section attestent que le questionnement physiologique amène aussi au développement de nouveaux outils souvent sophistiqués et généralement nécessaires pour améliorer la résolution temporelle, la proximité avec les conditions natu-

relles ou la spécificité des mesures : nouvelles sondes intracellulaires codées génétiquement, microscopes bi-photoniques à accès aléatoire permettant d'illuminer sélectivement les points d'intérêt avec une résolution temporelle élevée, imagerie profonde *in vivo* par faisceaux de fibres optiques, *dynamic-clamp in vivo* pour tester le rôle de conductances simulées dans des neurones réels dans leur environnement natif, compensation active du filtrage des électrodes dans les enregistrements *in vivo*, etc. Enfin, il faut souligner que la neurophysiologie va sans doute connaître une grande évolution avec l'avènement des techniques optogénétiques permettant non seulement de suivre l'activité de types neuronaux identifiés *in situ* mais également de les stimuler ou de les inhiber sélectivement avec une grande précision temporelle. Ces procédés ouvrent d'immenses perspectives pour les neurosciences intégratives, là où la diversité des types cellulaires, la faible résolution temporelle des approches pharmacologiques et la faible spécificité des approches électriques limitaient l'interprétation des données expérimentales.

Les neurosciences forment donc une discipline intégrée aux questionnements et méthodologies spécifiques. Son projet global de compréhension du lien entre les processus moléculaires et des fonctions qui comptent parmi les plus complexes du vivant requiert une multiplicité d'approches expérimentales et se caractérise par la multiplicité des échelles étudiées. Enfin, ce sont aussi des disciplines mixtes, le lieu des adaptations neuro-endocrines, neuro-musculaires, neuro-vasculaires qui démontrent tout l'intérêt de maintenir des chercheurs de ces spécialités associées au sein d'une même Section de Physiologie.

## 2.5 LES FONCTIONS DES CANAUX IONIQUES

La fonction et la régulation des canaux ioniques sont des thèmes transversaux de la Section dans la mesure où leur étude ne fait pas référence à un organe mais à des méca-

nismes qui existent dans toutes les cellules, la régulation des flux ioniques et du potentiel de membrane. Plusieurs équipes de la Section sont reconnues pour leurs travaux sur les canaux sodium, calcium, potassium, chlore et sur les canaux TRP. Les faits récents à souligner sont relatifs à la constitution des canaux ioniques en complexes protéiques et au rôle des canaux ioniques dans des perceptions sensorielles telle que la mécano-sensibilité et la douleur, dans les couplages excitation/contraction cardiaque et squelettique, dans la physiologie rénale et dans la régulation de l'excitabilité dans le système nerveux central. Ces thèmes ont été choisis du fait de résultats obtenus par des équipes de la Section.

Les canaux ioniques apparaissent maintenant comme des unités fonctionnelles hétéromériques très dynamiques. Les divers constituants des canaux interviennent dans leur maturation, leur trafic, leur localisation et ancrage à la membrane et l'activité du canal *per se*. C'est le cas par exemple des canaux TRPC1 et TRPC4, voies d'entrée du calcium dans le réticulum sarcoplasmique, ancrés à la dystrophine I par l' $\alpha$ 1-syntrophine dans les muscles squelettiques. C'est aussi le cas du canal potassium, Kv1.5 mature des cardiomyocytes auriculaires ancré à la membrane des disques intercalaires par la protéine SAP97, ou stocké dans des vésicules sous-membranaires sous la dépendance de Rab11. Certaines structures comprennent plusieurs types de canaux ioniques tel le canal chlore CFTR impliqué dans la mucoviscidose, TRPC6 dans les cellules épithéliales bronchiques, ou KCNQ1 et HERG, deux canaux potassium cardiaques impliqués dans le syndrome du QT long, association à l'origine de régulations réciproques.

Les canaux ioniques mécano-sensibles sont impliqués dans la transduction de la force mécanique en signaux électriques et chimiques. Ils interviennent dans la perception tactile et auditive, la déformation des endothéliums, l'étirement de la muqueuse digestive et la déformation cellulaire sous l'effet d'un choc hypo osmotique. L'identité moléculaire des canaux mécano-sensible reste cependant incertaine. Des propriétés de mécano-sensibi-

lité sont décrites pour divers types de canaux  $K^+$ ,  $Cl^-$ , TRP, pour le canal sodium épithélial ENaC et chez les invertébrés pour des canaux dont les équivalents chez les mammifères sont mal connus. Néanmoins ces propriétés ne reflètent que très partiellement celles des canaux mécano-sensibles de la peau ou de l'oreille interne. On peut souligner deux résultats importants relatifs aux canaux potassium à 2 pores ( $K_{2P}$ ) et aux canaux TRP. TREK-1 est un canal potassique  $K_{2P}$  dont l'ouverture dépend de la tension membranaire. La force mécanique est transmise directement au canal par l'intermédiaire de la bicouche lipidique. De plus, TREK-1 est ouvert par la chaleur, l'acidose intracellulaire, les anesthésiques généraux volatils et les acides gras poly-insaturés. Les domaines moléculaires responsables de l'activation de TREK-1 ont été identifiés. Le canal TREK-1 est donc un canal ionique sensorial polymodal modulé par des stimuli physiques et chimiques. Le canal cationique TRPP2 (ou polycystine 2) forme le complexe polycystine avec la protéine membranaire polycystine1 (PC1). Ce complexe subit des mutations multiples dans la polykystose rénale autosomique dominante. Le canal TRPP2 a la particularité de se localiser dans la membrane plasmique ou dans le réticulum endoplasmique. Couplées par leurs parties C-terminales, les fonctions des deux protéines sont régulées par leur interaction. La stimulation de PC1 par des facteurs mécaniques (comme le flux hydrique) dissocie le complexe et enclenche pour PC1 une fonction d'activateur des protéines G et pour TRPP2 une fonction de canal cationique. On est donc en présence d'un schéma inédit de couplage récepteur / canal et d'un nouveau type de détecteur mécanique. D'autres canaux de la famille TRP sont candidats à la détection de l'osmosensibilité (TRPV4) ou de la déformation mécanique (TRPA1).

La douleur inflammatoire et la douleur neuropathique s'accompagnent de très nombreux changements dans l'expression et l'activité des canaux ioniques. Un point à souligner est la focalisation de plusieurs équipes de la Section sur les canaux ioniques du neurone sensoriel et des neurones intégrateurs de la moelle épinière, sur les mécanismes de la

transduction nociceptive et sur les changements qui accompagnent la sensibilisation périphérique observée pendant la douleur inflammatoire. Ces compétences concernent les canaux sensibles à l'acidose (ASIC), les canaux  $K^+$  à 2P, les canaux  $Na^+$  et les canaux  $Ca^{2+}$ . La régulation des canaux sous l'effet des facteurs inflammatoires, l'organisation des complexes de signalisation associés à ces canaux et la fonction des canaux calcium médullaires pré et post-synaptique ont été particulièrement analysés.

Au niveau cardiaque, il a été démontré que le canal calcium Cav1.3 joue un rôle majeur dans l'origine de l'activité pacemaker en générant la dépolarisation diastolique dans les cellules du nœud sino-atrial. Des approches de génomique ont permis d'établir la redondance fonctionnelle de plusieurs canaux ioniques dans l'origine du mécanisme de pacemaker, améliorant nos connaissances physiopathologiques et les perspectives de traitement des ischémies cardiaques. Il était établi que pendant une arythmie avec échecs de contraction il se produit une accumulation de calcium via les récepteurs ryanodine; nous savons maintenant que cette accumulation diminue le courant potassium diastolique IK1 des myocytes ventriculaires ce qui élargit les hypothèses physiopathologiques. Une analyse comparée de la fonction et de la régulation de ces récepteurs à la ryanodine dans le cœur et dans le muscle squelettique a conduit à la mise en évidence d'altération identique de la fonction de ces canaux au cours de l'insuffisance cardiaque, mais aussi au cours du diabète, rendant compte dans ces deux situations pathologiques d'une dysfonction myocardique et d'une fatigabilité musculaire accrue. L'apport de la génomique des canaux ioniques en cardiologie est un fait majeur de la Section. Par exemple, le syndrome d'Andersen désigne une paralysie périodique congénitale associée à un allongement du QT et à des dysmorphies de développement assez bénignes. Il a été montré que toutes les mutations identifiées conduisent à la perte de fonction du canal Kir2.1, produit du gène KCNJ2.

Au niveau rénal, des modèles d'invalidation génique ciblé sur le tubule proximal ont

été réalisés. Lors de la réabsorption de bicarbonate au niveau du tubule proximal il se produit une alcalinisation qui active le courant  $K^+$ 2P Task2. L'absence de Task2 conduit à une acidose métabolique qui rappelle les symptômes cliniques observés dans le syndrome humain d'acidose tubulaire proximale. Le courant Task2 est essentiel pour la régulation du volume des cellules épithéliales du tubule proximal. TWIK1, un autre canal de la famille  $K^+$ 2P est exprimé dans le tubule proximal, la partie distale du tubule convoluté et la médulla du canal collecteur. Les souris TWIK1  $-/-$  ont une capacité réduite à stabiliser les contenus en phosphates plasmatiques. Il est intéressant de noter que de même que pour les canaux TREK, l'environnement lipidique module la balance allostérique de l'échangeur  $Na^+/H^+$ .

Enfin dans le système nerveux central, la notion de plasticité de l'excitabilité, complémentaire de la plasticité synaptique, s'est imposée et révèle l'importance fonctionnelle de la régulation des canaux  $Na^+$  et  $K^+$  des dendrites ou de l'axone. Souvent l'augmentation d'excitabilité est associée à une diminution des courants produisant l'hyperpolarisation suivant le potentiel d'action. Par exemple son niveau, et donc sa régulation, conditionnent la variabilité de la décharge des motoneurones spinaux. La régulation par les neurotransmetteurs des caractéristiques des courants  $Na^+$  de l'axone et des dendrites est un autre mécanisme efficace de régulation de l'excitabilité, en particulier des potentiels d'action rétro propagés. L'activation des récepteurs metabotropiques du glutamate modifie à la fois la courbe d'inactivation de la composante transitoire et la courbe d'activation de la composante persistante du courant  $Na^+$ .

La possibilité d'étudier les canaux ioniques de façon transversale et évolutive est riche de potentialités pour l'avenir et représente une spécificité de la recherche au CNRS.

## 2.6 MÉCANOSENSIBILITÉ

L'analyse des fonctions motrices et de leur régulation représente un domaine majeur

et transversal de la physiologie qui résulte de la capacité du vivant à générer des forces mécaniques en réponse aux conditions de son environnement incluant, les forces de gravité et les contraintes mécaniques, les conditions physico-chimique du milieu, les stimuli de la communication cellulaire ou de l'environnement. À l'échelle globale, la capacité motrice donne aux animaux une de ses spécificités essentielles qui les distingue du règne végétal : sa mobilité par rapport à son environnement.

Cette fonction motrice et la capacité à générer une force mécanique se retrouvent à tous les étages de l'organisation du vivant et des fonctions qu'il contrôle : à l'échelle moléculaire on la retrouve dans les interactions protéiques et dans la fonction des moteurs moléculaires, au niveau cellulaire la mise en jeu de ces forces est retrouvée dans le transport vésiculaire, le trafic intracellulaire, la migration et la division cellulaire, la phagocytose, l'adhérence et plus généralement dans la contraction cellulaire qui repose largement sur la relation contractile acto-myosine. À l'échelle des organes, la fonction motrice s'illustre entre autre par la contraction musculaire, la motricité digestive, les fonctions respiratoires et cardiovasculaires comprenant l'angiogénèse. Chez l'individu, la coordination et le contrôle de ces processus définissent les très nombreuses modalités du mouvement en rapport avec leurs finalités biologiques et le milieu de vie.

À cette capacité à générer une force motrice s'ajoute, non moins importante, la capacité de transmettre ou de détecter le mouvement mécanique généré : à lui seul, à l'échelle cellulaire, le cytosquelette et ses échafaudages protéiques membranaires et sous-membranaires en relation avec la matrice extracellulaire constituent un système qui sert à la fois à donner sa forme et sa résistance à la cellule et à « sentir » l'extérieur, ses mouvements, ses contraintes mécaniques pour finalement adapter les réponses physiologiques. Que ces fonctions mécaniques soient altérées et il en résulte de graves dysfonctionnements, mettant souvent en cause le pronostic vital comme le décrit la pathophysiologie qui ne peut se comprendre sans une approche détaillée des mécanismes physiologiques de base.

Les équipes de la Section 25 impliquées dans ce thème analysent d'une part les fonctions induites par des molécules impliquées dans la genèse de forces mécaniques que l'on retrouve classiquement dans les fonctions musculaires squelettiques, cardiovasculaires, digestives et respiratoires, et à un niveau moins spécialisé, elles concernent aussi toutes les cellules de l'organisme. Certaines de ces équipes étudient les adaptations fonctionnelles du vivant aux contraintes mécaniques.

Les avancées des connaissances ont concerné l'identification, la caractérisation, la régulation de déterminants moléculaires impliqués dans la génération de force et dans le couplage excitation-contraction des cellules musculaires de *C. elegans*. Une interaction fonctionnelle entre un canal cationique (UNC-105) et une chaîne de collagène (LET-2) a été identifiée avec des implications potentielles dans les mécanismes qui couplent étirement/déformation membranaire et excitabilité cellulaire. Pour le muscle squelettique de mammifère le rôle de l'oxyde nitrique dans la régulation du couplage excitation-contraction du muscle de mammifère a été démontré. De même, il apparaît que le calcium, au-delà de son rôle comme activateur de la fonction contractile, participe à des régulations fines de l'homéostasie générale de la cellule musculaire squelettique. Ainsi les transferts de  $Ca^{2+}$ , même au repos, sous forme de libérations quantiques entre les stocks internes et le cytosol s'exacerbent dans les cellules dystrophiques et mettent en jeu les récepteurs à l'IP<sub>3</sub>, dont le rôle avait été peu décrit dans ce type de préparation. Enfin il apparaît que le cytosquelette, intervient non seulement comme infrastructure de la cellule musculaire, mais aussi comme système de signalisation au travers des échafaudages protéiques (comme l'association dystrophine/alpha-syntrophine/TRPCs) permettant de moduler les transferts de calcium à travers les canaux TRPCs qui sont à la fois mécano-sensibles et dépendants des stocks internes en calcium.

TREK-1 est un canal mécanosensible présent sur les neurones sensitifs et apparaissait être un candidat potentiel dans la détection

des pressions mécaniques à bas seuil au niveau cutané. Toutefois TREK-1 a été récemment localisé au niveau vasculaire. Il est majoritairement impliqué au niveau endothélial et pourrait ainsi participer à l'intégrité de la voie calcium dépendante du NO (à la suite de l'activation d'un récepteur couplé à une protéine G), nécessaire au développement de la vasodilatation induite par la pression.

La perte de l'homéostasie calcique intracellulaire serait impliquée dans le développement de la polykystose rénale autosomique dominante (PKRAD). Elle serait liée aux mutations des gènes PKD1 et PKD2, codant pour les polycystines TRPP1 et TRPP2 qui contrôlent les échanges d'ions calcium entre la cellule et milieu extérieur. Le rapport TRPP1/TRPP2 régule les canaux ioniques mécanosensibles via filamine A (FLNA) /F-actine du cytosquelette et module la réponse myogénique artérielle en réponse à la pression intraluminaire. Ainsi, une altération du rapport TRPP1/TRPP2 peut donc modifier la transduction de la mécanosensibilité au niveau cellulaire.

Concernant les flux énergétiques qui conditionnent la contractilité cardiaque, des microdomaines énergétiques se créent au contact entre mitochondries et ATPases et conditionnent les mouvements de calcium et la contractilité dans le cardiomyocyte ou le muscle squelettique. Ces résultats mettent l'accent sur l'importance de l'architecture cellulaire et définissent un triptyque architecture/énergétique/fonction qui conditionne le rendement de la contraction du myocyte. Les altérations du cytosquelette (souris invalidées pour des protéines du cytosquelette MLP et desmine) perturbent ces microdomaines énergétiques, participent aux altérations fonctionnelles dans ces modèles et précipitent l'insuffisance cardiaque. Une autre découverte qui peut avoir des conséquences importantes pour la réponse du myocarde à l'étirement (Loi de Frank-Starling) est que les mitochondries exercent des contraintes mécaniques directes sur les myofilaments et modulent leur interaction et leur sensibilité au calcium.

Des données récentes montrent que la sensibilité au calcium du cardiomyocyte en

réponse à l'étirement n'est pas uniforme à travers l'épaisseur ventriculaire, augmentant de la zone sous-épicardique vers la zone sous-endo-cardique et qu'elle est corrélée à l'augmentation de la tension passive. Cette activation myofibrillaire dépendante de la tension passive est associée à la phosphorylation de la chaîne légère de la myosine (MLC2b) spécifiquement dans le sous-endocarde. Ce gradient de sensibilisation au calcium disparaît dans le sous-endocarde après infarctus du myocarde, contribuant à la défaillance contractile post-infarctus. Des travaux récents ont également permis de mettre en évidence le rôle de la stimulation  $\beta$ -adrénergique sur la sensibilité au  $\text{Ca}^{2+}$  des myofilaments de cardiomyocytes et de démontrer à l'aide d'une souris transgénique déficiente en protéine C (ou MyBP-C pour Myosin Binding Protein-C, KO) le rôle prépondérant de cette protéine.

Dans le muscle lisse vasculaire, le rôle des petites protéines G de la famille Rho dans le contrôle de la contractilité des muscles lisses vasculaires a été exploré. L'action vasodilatatrice exercée par l'endothélium sur le muscle lisse vasculaire est due en grande partie à une phosphorylation inhibitrice de la protéine RhoA induite par le recrutement de la protéine kinase G par la voie du monoxyde d'azote endothélial. Des résultats importants concernent la mécanosensibilité et les adaptations aux contraintes mécaniques dans le système vasculaire. Ainsi, la matrice extracellulaire, et les interrelations cellules-cellules semblent ordonner la forme et la fonction des cellules en produisant des changements du cytosquelette. De tels changements dépendant du substrat sont transmis par des structures adhésives des cellules à partir desquelles s'appliquent des forces contractiles générées par le complexe d'actomyosine. Les sites d'adhérences des cellules s'organisent autour de récepteurs membranaires considérés comme des jauges de contrainte/déformation. A ce titre, ces récepteurs sont des mécanosenseurs capables de déclencher des voies de signalisation. D'autres récepteurs ont une sensibilité modifiée par l'environnement physique des cellules ou alors activent des voies de transduction différentes.

L'endothélium vasculaire est le bon exemple d'un organe qui ressent des contraintes mécaniques diverses, depuis les liaisons accrocheuses des p-sélectines des cellules sanguines, qui roulent sur l'endothélium et qui vont conditionner son activation, jusqu'aux forces de cisaillement produites par le débit sanguin et les contraintes pariétales générées par la pression. L'analyse des mécanismes de l'angiogénèse a montré que la phase d'activation de l'endothélium qui initie ce processus implique la phosphorylation sur tyrosine des VE Cadherines. Ce processus est impliqué de façon majeure dans l'angiogénèse tumorale. Plus généralement, l'angiogénèse implique une réponse vasculaire à des contraintes mécaniques modifiées durablement. Lorsqu'il s'agit de répondre à une ischémie ou à un exercice physique le débit sanguin modifié est perçu par les cellules endothéliales (augmentation des forces de cisaillement) et un processus inflammatoire est initié afin de dissocier la matrice extracellulaire, ce qui permet à la paroi artérielle de s'adapter dans sa structure et dans ses fonctions. Un débit augmenté chroniquement entraîne un remodelage artériolaire expansif hypertrophique et une amélioration des fonctions dilatatrices de l'endothélium. Dans les artères de gros calibre les contraintes de cisaillement déterminent des zones de susceptibilité de la paroi artérielle et participent au phénomène d'athérosclérose.

## 2.7 ENDOCRINOLOGIE

Les régulations endocriniennes et neuroendocriniennes contrôlent et intègrent plusieurs processus physiologiques, incluant le développement, la croissance, la puberté et la reproduction. Impliqués dans le contrôle central et périphérique du métabolisme, des fonctions cardiovasculaires, ostéo-articulaires et immunes, les signaux endocrines sont à la base de plusieurs processus fondamentaux et pathologiques.

Des équipes de la Section ont apporté des contributions significatives dans la compréhens-

sion des interactions neuroendocriniennes et l'intégration des contrôles hypothalamiques/hypophysaires. En particulier, une meilleure compréhension des régulations gouvernant le comportement alimentaire, l'équilibre énergétique et les maladies métaboliques a été obtenue, ainsi que des informations essentielles sur les mécanismes centraux gouvernant ces fonctions. Le champ de la recherche dans ce domaine dépasse la neuroendocrinologie et inclut des aspects importants de régulations neurovégétatives. L'analyse des mécanismes des rétrocontrôles hormonaux constitue un autre aspect important dans lequel plusieurs équipes françaises apportent des contributions originales, la découverte des neurostéroïdes ayant ajouté une dimension supplémentaire à ces études. De plus des études importantes ont démontré l'implication fonctionnelle des processus de plasticité neurogliale dans la mise en place ou la physiologie de divers axes neuroendocriniens. Ces interactions participent au contrôle de la rythmicité propre à chacun de ces systèmes neuronaux. Ces mécanismes sont également impliqués dans la rythmicité circadienne, notamment des sécrétions hormonales. Les interactions neurones, glies, cellules endothéliales, sont également importantes dans le contexte du développement de l'axe hypothalamo-hypophysaire. Les mécanismes moléculaires impliqués, incluant l'analyse de la signalisation intra et intercellulaire, sont étudiés tant au niveau central qu'hypophysaire, et les cascades de facteurs de transcription impliqués dans le développement hypophysaire analysées.

Le domaine particulier du contrôle neuroendocrine de la reproduction devrait fournir des résultats prometteurs : compréhension du mécanisme de base à l'origine de l'activité pulsatile des neurones à GnRH et régulation par des facteurs internes et externes, détermination des interactions entre métabolisme et reproduction à tous les niveaux de contrôle de la fonction de reproduction chez la femelle, ou dans l'élucidation du rôle des xénobiotiques sur la fonction de reproduction chez le mâle.

La neuroendocrinologie est très présente dans les études concernant le vieillissement.

S'il est acquis en effet que le contrôle central hypothalamique régulant l'équilibre et les interactions (neuro)-endocrines est réajusté lors du vieillissement, on ne sait toujours pas s'il s'agit d'une cause ou d'une conséquence. De plus, les analyses du rapport bénéfice/risque des traitements substitutifs permettant de préserver une qualité de vie chez les personnes âgées restent à être établies.

Les effets environnementaux sur l'expression de gènes et de réseaux de gènes cibles des signaux endocrines, en particulier sur les modifications épigénétiques au niveau de l'expression des récepteurs sont mieux appréhendés. En attestent les résultats démontrant que le promoteur du récepteur des glucocorticoïdes dans le cerveau est la cible de méthylations durables ou ceux montrant que la régulation de la transcription dépendant du récepteur aux oestrogènes implique des méthylations cycliques et rapides. Le décryptage des mécanismes moléculaires à la base des régulations endocriniennes et de leurs interactions centrales et périphériques, est par conséquent essentiel. Il repose en partie sur des études impliquant des approches de génomique comparée et sur l'exploitation d'approches de physiologie et d'endocrinologie comparée. Grâce à une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux, de nouvelles avancées dans l'identification des perturbateurs endocriniens et leurs actions sur la santé humaine et l'environnement sont prévisibles.

La recherche sur les tumeurs endocrines vise à comprendre les mécanismes de l'hyper-sécrétion hormonale et de la croissance tumorale des tumeurs bénignes et malignes. Des travaux se concentrent également sur les mécanismes de l'hormono-sensibilité d'un grand nombre de cancers (prostate, sein...), et portent principalement sur l'étude de la signalisation, en particulier les relais du message hormonal, et la génétique moléculaire spécifique aux tumeurs endocrines. Aussi, les recherches sur les tumeurs neuroendocrines sporadiques ou familiales, bénéficient de l'ensemble des études concernant les mécanismes moléculaires impliqués dans la tumorigenèse, ce qui ouvre de nouvelles perspectives en termes de cibles thérapeutiques.

Enfin, les maladies rares ne constituent pas un enjeu de santé publique mais sont des modèles permettant de mieux comprendre la physiologie hormonale et parfois l'opportunité de réfléchir à de nouveaux développements thérapeutiques. C'est le cas ainsi des maladies rares de la reproduction (insuffisances ovariennes et hypogonadismes hypogonadotropes), des pathologies du métabolisme phospho-calcique ou des maladies liées à des anomalies des récepteurs membranaires. La constitution de cohortes de patients dans des Centres dédiés à l'étude des maladies rares tout comme le développement de projets de recherche translationnelle *via* des programmes de financement spécifiquement est à promouvoir.

Au vu de ces observations, l'endocrinologie reste une discipline dynamique. Néanmoins, en dépit des avancées obtenues et de l'importance des régulations endocriniennes dans de multiples processus physio-pathologiques, la section attire l'attention sur le fait que la part de l'endocrinologie dans les publications françaises a baissé ces dernières années (de 5,1 % à 3,4 % entre 2005 et 2008). Cette observation semble être une conséquence de l'inquiétante diminution du nombre d'équipes françaises se consacrant à la neuroendocrinologie.

### 3 – CONCLUSION

La nature par essence intégrative de la physiologie repose sur l'interdisciplinarité. Cette pratique de l'interdisciplinarité rend le physiologiste apte à la communication avec les autres disciplines non physiologiques, soit en termes d'applications, soit en termes de concepts ou d'outils.

En ce qui concerne les applications, outre celles évoquées dans la section précédente, la physiologie se trouve en amont de la recherche thérapeutique car les mécanismes étudiés peuvent conduire à l'identification de nouvelles cibles moléculaires d'intérêt. C'est éga-

lement dans ce contexte que les chercheurs/laboratoires de la section développent de plus en plus des analyses comparatives entre modèles sains et pathologiques. Les études physiopathologiques sont indispensables à la détermination de cibles thérapeutiques, mais elles apportent aussi beaucoup à la connaissance fondamentale. Les pharmacologues fournissent également des outils d'investigation précieux aux physiologistes. Les champs d'application de la physiologie concernent également l'homme au travail (l'ergonomie) et les sciences spatiales (l'homme dans l'espace). Ils nécessitent une articulation avec les disciplines correspondantes.

En ce qui concerne les concepts, de nombreuses complémentarités scientifiques existent entre la Section 25 et les autres Sections de l'Institut National des Sciences Biologiques (INSB) impliquées dans le développement, les neurosciences, le comportement, les biomolécules, la thérapeutique. Par exemple, les bases cellulaires, moléculaires et génétiques qui sous-tendent le fonctionnement des réseaux de neurones ont été révélées au cours des trois dernières décennies. Cependant ces connaissances ne permettent pas de comprendre les bases neurales des réseaux complexes impliqués dans le mouvement, la perception (système visuel, douleur, etc.) ou la mémoire. Seule une approche multidisciplinaire permet de comprendre le fonctionnement des réseaux neuronaux et en conséquence celui du cerveau. En ce qui concerne les outils, nous avons vu que la physiologie exploite pleinement les outils du post-génome mais qu'elle repose aussi sur les progrès de nombreuses techniques y compris celles de la biologie et de la génétique moléculaires, de l'imagerie cellulaire ou d'organe, du traitement des signaux physiologiques pour en extraire des informations nouvelles ou/et permettre leur traitement à distance, de modélisation des systèmes physiologiques complexes.

Ce n'est qu'en associant des cultures scientifiques de champs différentes que la physiologie pourra à partir de propriétés microscopiques des éléments constitutifs d'un ensemble comprendre les propriétés macro-

scopiques de l'ensemble. Si des collaborations entre mathématiciens ou physiciens ont déjà été mises en place dans plus de la moitié des laboratoires de la Section 25, une interdisciplinarité « élargie » doit cependant encore être développée afin d'aborder les fonctions organiques dans leur globalité. Le CNRS, fort de ses différents instituts, a les moyens de développer une interdisciplinarité réelle. Pour favoriser ces échanges il est nécessaire qu'à l'avenir l'ensemble des domaines de la physiologie soit maintenus et développés et que la Section 25 soit partie prenante dans les commissions interdisciplinaires, souhait déjà fortement émis pour participer à des CID.

Il reste à souligner plusieurs points. La tendance forte et récente des appels d'offre sur programme, souvent thématiques, peut rendre difficile le financement d'une recherche intégrative, c'est-à-dire à la frontière de plusieurs champs thématiques. D'autre part, l'évaluation des résultats et de la viabilité des équipes ou unités de recherche par l'AERES, évaluation faite sur des temps courts par rapport aux temps d'étude de systèmes complexes, risque d'entraîner une dérive des directeurs de recherche pour proposer uniquement des recherches rentables à court terme. L'Agence Vie et Santé (Aviesan), de création toute récente et dont la fonction n'est pas clairement définie, aura-t-elle un impact sur le pilotage des recherches en physiologie? Enfin, les politiques de gouvernance de recherche des universités doivent s'harmoniser avec celles du CNRS. Si la discipline n'a pas changé, les conditions d'exercice de cette discipline sont donc en profond remaniement. Il faut espérer que les gouvernants seront assez perspicaces pour considérer qu'une recherche en physiologie, c'est-à-dire destinée à comprendre le fonctionnement des organismes sans forcément d'application immédiate, a toujours sa place au sein du système de recherche français. Les résultats des équipes de la Section 25 montrent que c'est le cas.

Notre section qui regroupe, plus que toutes autres, des laboratoires travaillant à différents niveaux d'intégration devrait permettre l'inter-fécondation entre différentes théories ou

différentes écoles de pensée. La pression forte des « molécularistes » entraîne la disparition des compétences techniques et conceptuelles en physiologie des nouveaux entrants au CNRS et à l'université. Il est en effet très difficile d'envisager de présenter un candidat au CNRS ou à l'INSERM sur un sujet souvent qualifié, de manière condescendante, de physiologie classique. Seules les universités provinciales, soumises à moins de pression, peuvent parfois faire ce choix là, ce qui n'est pas le moindre des paradoxes. Concernant les unités labellisées, les UMRs de physiologie recrutent principalement de jeunes enseignants-chercheurs rompus aux techniques de la biologie moléculaire et de la génétique mais

dont les compétences en physiologie intégrée sont fort peu assurées. L'enseignement futur de la physiologie sera donc effectué par des chercheurs, certes compétents dans leur domaine, mais avec une vision très réductionniste du fonctionnement d'un organe voire d'un organisme. Même si on a une foi solide en la vision post-génome, il ne faut pas oublier que si on veut des physiologistes pour tester des modèles animaux, il faudra les former. Sinon on risque de se retrouver avec des chercheurs ayant une vision purement livresque de la physiologie et dont les expérimentations et les interprétations peu approfondies poseront un problème de crédibilité, ce qui dans une perspective thérapeutique, n'est pas sans danger...

# 26

## DÉVELOPPEMENT, ÉVOLUTION, REPRODUCTION, CELLULES SOUCHES

*Présidente*

Catherine JESSUS

*Membres de la section*

Yves COMBARNOUS

Chantal DAUPHIN-VILLEMANT

Pascal DOLLE

Anne DUITTOZ

Patrick GARIGLIO

Sophie JARRIAULT

Christian JAULIN

Vincent LAUDET

Gabriel LIVERA

Jean-Claude LOZANO

Sylvie MAZAN

Marc MOREAU

Stéphane NOSELLI

Claude PRIGENT

Julien ROYET

Sylvie SCHNEIDER-MAUNOURY

Pierre THIEBAUD

Christophe TIFFOCHE

Daniel VAIMAN

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le champ de recherche « Développement, Évolution, Reproduction, Cellules Souches » est issu de la rencontre de l'embryologie classique avec la zoologie et la génétique traditionnelles et de l'apport de la biologie moléculaire, de la biologie cellulaire et, plus récemment, de la génomique. Il s'agit donc d'une recherche multidisciplinaire, transversale par essence, intégrative de concepts et de méthodologies. Ses enjeux majeurs, fondamentaux, médicaux et sociétaux sont reflétés par l'existence de sections dédiées à cette thématique dans les revues multidisciplinaires les plus prestigieuses, telles que Nature, Science ou PNAS. Le très fort impact de journaux de la discipline (Nature Genetics, Genes & Development et Developmental Cell) et la profusion de Conférences et cours internationaux organisés autour des grands thèmes de la biologie du développement, de l'évolution, de la reproduction, et des cellules souches, témoignent de la place centrale des thématiques de la section dans la biologie moderne. Nous présentons ici un état des lieux des connaissances dans les domaines couverts par notre section ainsi qu'une revue des avancées les plus marquantes issues des travaux des chercheurs de la section. Cette présentation non exhaustive est scindée en cinq grands chapitres scientifiques partiellement chevauchants :

- I. Ontogénie et Évolution
- II. Reproduction
- III. Cellules souches
- IV. Quelques avancées récentes
- V. Enjeux technologies et organisationnels

C'est pendant la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle que les relations entre les processus du développement et l'évolution passent au centre des interrogations des biologistes. Intégrant le postulat que la cellule est l'unité de base et le point de départ de tout corps organisé (C. Schleiden, T. Schwann), il s'agit d'abord d'une analyse descriptive de la morphologie et de l'embryologie comparée des êtres vivants, visant à résoudre les controverses issues des débats de G. Cuvier et G. St Hilaire sur l'organisation du vivant et de la publication de l'origine des espèces par C. Darwin. Cette phase d'effervescence intellectuelle intense, fondatrice de l'Evo-Devo moderne, conduit à la formulation de théories nouvelles quant à l'organisation du vivant (lois de Von Baer, théorie de la recapitulation...) mais connaît ensuite une longue éclipse, qui durera jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Le début du XX<sup>e</sup> siècle est marqué par l'essor de l'embryologie expérimentale, sous l'impulsion en particulier de W. Roux. Cette discipline ne vise plus uniquement à formuler mais à tester des hypothèses et permet de mettre en évidence les propriétés de plasticité et de régulation du développement embryonnaire, puis les notions de compétence, détermination et différenciation cellulaire et/ou tissulaire. De ces travaux réalisés principalement sur des modèles amphibiens et invertébrés marins vont aussi découler les concepts de centre organisateur, d'induction tissulaire (Hörstadius, Spemann, Mangold) et de déterminants cytoplasmiques et corticaux. C'est de manière indépendante (pour des questions d'école) que la redécouverte des lois de Mendel au début du XX<sup>e</sup> siècle, jointe à la démonstration du rôle des noyaux, puis des chromosomes, dans la transmission héréditaire et à la description du processus de mitose, que se développe la génétique (comme étude de la nature des caractères héréditaires)

avec en particulier, les travaux pionniers de T. Morgan sur la drosophile. Les travaux des généticiens mènent rapidement au concept de gènes, d'allèles et à l'établissement de cartes chromosomiques. Jusqu'à la fin des années 1960, l'embryologie, la génétique et l'évolution restent des disciplines essentiellement séparées, y compris au niveau des enseignements. L'irruption de la biologie moléculaire au milieu des années 70 et l'intuition de généticiens de génie comme E. Lewis vont permettre de rapprocher génétique et développement avec l'ambition affirmée de comprendre comment l'information contenue dans le génome est interprétée et traduite en termes de forme, de taille et de fonctions cellulaires et tissulaires au cours de l'embryogenèse. Le premier constat majeur qui s'impose au milieu des années 90 est la surprenante universalité des gènes de contrôle du développement et des mécanismes de signalisation dans les différents phyla qui contrastent avec la disparité de taille et de morphologie des animaux adultes et avec la complexité de leurs génomes. Ce constat rend d'autant plus impérieux la nécessité de mener une recherche intégrative sur le développement embryonnaire utilisant à la fois des organismes modèles et une grande diversité d'espèces afin de comprendre les mécanismes de l'évolution et de l'adaptation du vivant ainsi que l'origine génétique et épigénétique de malformations du nouveau-né et de pathologies humaines. Les recherches abordent de manière croissante les impacts de l'organisation et du comportement des cellules sur les processus développementaux. Il est donc désormais urgent de développer des approches conduisant à une vision intégrée dans l'espace et dans le temps des processus de prolifération, migration, différenciation et des réseaux de régulation mis en œuvre, qui conditionnent morphogenèse et organogenèse. Le domaine doit bénéficier au plus vite des concepts et des outils de la biologie systémique. En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, grâce à l'explosion des nouvelles technologies d'imagerie, de génomique et de bio-informatique, et grâce au développement des interfaces avec les mathématiques, la physique et l'ingénierie, l'étude des mécanismes moléculaires, cellu-

lares et physiologiques du développement et de l'évolution reste plus que jamais un enjeu central des recherches en biologie auquel le CNRS se doit de contribuer en première ligne.

## 1 – ONTOGÉNIE ET ÉVOLUTION

Un des enjeux majeurs des recherches sur la reproduction, le développement animal et l'évolution est de comprendre les bases cellulaires et moléculaires de la diversité anatomique et physiologique du vivant et de son adaptation à l'environnement. Les comparaisons entre les organismes modèles issus des travaux d'embryologie classique et de génétique, principalement sélectionnés sur la base de leur capacité d'élevage en laboratoire, ont conduit dans les années 90 à la conclusion inéluctable (1) que le génome du dernier ancêtre commun à l'ensemble des animaux à symétrie bilatérale apparus depuis l'explosion cambrienne il y a environ 570 millions d'années était du même ordre de complexité que les génomes des bilatériens actuels et (2) que de façon encore plus surprenante, les programmes génétiques issus de cet ancêtre éloigné se retrouvaient étonnamment conservés chez les bilatériens actuels. Depuis lors, les travaux de type *Evo-Devo*, conduits chez un spectre d'organismes choisis pour leur position phylogénétique et donc beaucoup plus représentatifs de l'arbre des métazoaires dans son ensemble, ont permis d'étendre et d'affiner ces observations. Il est aujourd'hui clair que toutes les grandes familles de facteurs de transcription et de molécules de signalisation, y compris celles qui contrôlent la mise en place des polarités, étaient déjà présentes chez le dernier ancêtre commun des métazoaires, et non seulement des bilatériens. Ces études mettent également en évidence l'évolution complexe, marquée par de multiples pertes et recrutements, des modules génétiques qui contrôlent le développement, soulignant ainsi

les difficultés d'interprétation de leur conservation à grande échelle évolutive. Elles démontrent enfin le caractère parfois très divergent de certains organismes modèles traditionnels, qui souligne la nécessité absolue d'élargir l'échantillonnage phylogénétique des espèces modèles.

Actuellement, le développement de nouveaux organismes modèles bénéficie de l'énorme impact des nouvelles technologies de séquençage à haut débit qui permettent l'accès au séquençage génomique et aux données de transcriptome ou *ChIP/Seq* chez un spectre très large d'organismes. Il devient donc possible d'avoir accès à des informations concernant des espèces chez lesquelles les approches de génétique classique sont inenvisageables mais qui présentent un intérêt du fait de leur position phylogénétique, ou de particularités morphologiques ou physiologiques d'intérêt : capacité à régénérer (ex. ascidies coloniales, corde spinale de lamproie) ; zonation d'organes (ex. testicules de roussette) ; adaptations à des milieux particuliers associées à des phénotypes d'intérêt (ex. longévité, espèces cavernicoles). Le séquençage complet d'un nombre croissant de génomes, les données de transcriptomique, l'exploitation de banques de séquences transcrites, et les approches bio-informatiques jouent actuellement des rôles clefs dans l'essor de la discipline au plan international. Ils rendent accessibles un enjeu majeur de la biologie : comprendre comment l'évolution des génomes et donc celle des réseaux génétiques qui contrôlent l'ontogénie conditionne l'évolution des formes, question qui s'inscrit très précisément dans l'étude des relations entre génotype et phénotype. Par ailleurs, l'*Evo-Devo* a maintenant acquis les statuts d'une discipline à part entière, qui intègre les données de biologie du développement, de génomique, d'anatomie et de paléontologie par des approches descriptives, expérimentales et bio-informatiques. Deux grandes questions sous-tendent sa démarche. Il s'agit (1) de recenser les innovations génomiques et mécanistiques acquises à chacun des grands nœuds de l'arbre des métazoaires et des plantes afin de rechercher leurs corrélations avec l'évolution morphologique ou physiologique (macroévo-

lution) et (2) de décrypter les mécanismes moléculaires précis responsables de modifications phénotypiques au sein de populations ou d'espèces très proches (microévolution). Les questions fondamentales sous-tendant cette démarche sont intimement liées à l'identification des contraintes intrinsèques qui imposent une conservation des processus et l'évaluation de leur degré de plasticité en fonction de l'environnement.

Il est également important de noter que plusieurs chercheurs de renommée internationale dans le domaine du cycle cellulaire dépendent de la section 26. En effet, les œufs et les embryons précoces représentent des modèles cellulaires physiologiques extrêmement pertinents pour l'étude des mécanismes moléculaires régulant la division cellulaire (voir l'attribution du Prix Nobel de Physiologie et Médecine en 2001 attribué à Tim Hunt dont l'objet d'étude est l'ovocyte et l'embryon précoce de clam et de xénope). Inversement, le décryptage de ces mécanismes est indispensable à la compréhension de leur ré-utilisation pour la réalisation de cycles de division spécifiques au développement, comme les divisions méiotiques, ou les divisions asymétriques à l'origine des lignages. La présence de chercheurs phares du domaine du cycle voisinant avec des chercheurs plus spécifiquement intéressés par les processus de prolifération liés au développement au sein de la section 26 est donc particulièrement pertinente, enrichissante et encouragée.

Nous avons adopté pour des raisons de simplicité une présentation par modèle animal, et non par question scientifique, même s'il est évident que les modèles ne sont qu'un moyen de répondre aux questions, dans le cadre des limites imposées par chacun d'entre eux. Les principales questions abordées sur chacun de ces modèles et les unités CNRS ou associées de réputation internationale impliquées (voir le développement des acronymes des laboratoires en annexe) sont citées sous forme de mots-clés à la suite de l'exposé du modèle. Cette présentation des grands questionnements et avancées actuels n'est évidemment pas l'apanage de l'organisme modèle dont la

description précède. Il faut néanmoins remarquer l'importance de l'effet de communauté. Aux plans national comme international, il existe parallèlement aux colloques et écoles thématiques – type Gordon Conference/ Conférences Jacques Monod – des conférences et/ou cours périodiques centrés sur un modèle expérimental qui reflètent et ont un impact non négligeable sur le dynamisme des recherches sur le modèle concerné. Il importe que le CNRS soutienne ces initiatives. Il est à noter que depuis quelques années, de nombreuses équipes ne sont plus attachées à l'étude d'un seul modèle, mais abordent leurs questions biologiques sur la base de deux modèles, tirant ainsi profit de leurs avantages respectifs, soit parce qu'elles en ont acquis la maîtrise, soit par le biais de collaborations avec d'autres équipes de la même Unité. Il importe d'encourager cette nouvelle pratique de travail très interactive et de pousser à son prolongement, par la prise en compte d'une dimension phylogénétique, impliquant la reconstruction d'un état ancestral et l'identification des divergences propres à chaque taxon.

Les modèles phares de notre communauté se divisent en deux catégories, distinguées ci-dessous. La première correspond aux organismes modèles dont l'intérêt premier est l'élucidation et la dissection fine, sans données a priori, des mécanismes, aux plans génétique, moléculaire et cellulaire. Il s'agit principalement (mais pas exclusivement) d'organismes modèles étudiés de longue date et qui permettent des approches fonctionnelles sophistiquées. Ces modèles fournissent des références fonctionnelles incontournables qui justifient l'effort qui leur est consacré. Parmi ceux-ci, quatre animaux modèles permettant des analyses génétiques sont étudiés par nombre d'équipes de biologie : drosophile, nématode, poisson-zèbre et souris. Ces quatre modèles ont bénéficié très tôt du séquençage complet de leur génome, en parallèle au séquençage du génome humain. Deux modèles princes d'embryologie expérimentale, le poulet et le xénope, restent très présents en France. L'ascidie *Ciona intestinalis* et l'oursin *Strongylocentrotus purpuratus* peuvent également être rangés dans ce groupe compte tenu de la

taille de la communauté internationale concernée et la maturité des approches fonctionnelles disponibles, actuellement utilisées par un nombre important de laboratoires. La deuxième catégorie concerne des organismes d'étude généralement plus récente, qui se distinguent par des positions phylogénétiques clefs, dans des taxons généralement non pris en compte par les généticiens mais essentiels pour comprendre des transitions évolutives majeures. Il s'agit donc de modèles dont l'intérêt premier se situe dans une dimension comparative. La communauté française est riche d'expertises dans ce domaine, avec des groupes fortement impliqués dans l'étude de modèles d'un intérêt reconnu au plan international (*Clytia hemisphaerica*, *Platynereis dumerilii*, *Branchiostoma lanceolatum*, *Petromyzon marinus*, *Scyliorhinus canicula*). Il faut noter que la frontière entre ces deux catégories est évidemment poreuse, les organismes émergents aujourd'hui ayant vocation à rejoindre les premiers au fur et à mesure des développements méthodologiques et de l'augmentation des communautés scientifiques concernées, et les organismes modèles traditionnels se prêtant également à des études de type Evo-Devo, via des études de microévolution centrées sur des sous-populations variantes ou des espèces proches.

## 1.1 APPROCHES MÉCANISTIQUES : PRINCIPAUX MODÈLES

### Drosophile

Depuis les premières expériences de génétique formelle et de mutagenèse réalisées par T. Morgan, la drosophile n'a cessé d'être un des modèles favoris des généticiens. Deux éléments décisifs, au début des années 1980, sont à l'origine de l'importance prise par ce modèle : l'identification de très nombreux gènes de contrôle du développement et leur hiérarchisation dans le contrôle du processus de segmentation embryonnaire (C. Nusslein-Volhard et E. Wieschaus), et la mise au point de la transgénèse. Dès le début des années 1980,

quelques laboratoires français anticipent la puissance d'une analyse couplant biologie moléculaire, génétique et transgénèse et œuvrent pour le rebond de ce modèle en France (en particulier au CGM-Gif/Yvette, IGBCM-Strasbourg, IJM-Paris, ex-LGPD-Marseille). Depuis 25 ans, les recherches sur la drosophile ont permis de très nombreuses avancées dans les domaines aussi divers que la biologie cellulaire et la biologie du développement, l'immunité, la perception sensorielle, la mémoire, etc. L'archivage et la diffusion systématique des connaissances, la description et la libre circulation des souches mutantes et/ou transgéniques et d'outils moléculaires, qui restent une tradition sur ce modèle, permettent à des équipes isolées d'être très performantes, avec pour conséquence un grand nombre d'équipes actives dans de nombreux domaines en France. Le financement (principalement par le NIH, États-Unis) de programmes de séquençage, mutagenèse et de description anatomique et moléculaire du développement à très grande échelle continue d'être assuré, contribuant à l'intérêt du modèle. Les développements génomiques récents chez les drosophilidés permettent enfin des développements d'un intérêt majeur dans le domaine de la microévolution.

#### Thèmes abordés :

– Divisions cellulaires asymétriques, polarité planaire, transport intracellulaire (recouvrement partiel avec la section 23) : *CBD-Toulouse*, *CDC-Curie Paris*, *GBD-Curie Paris*, *CGMC-Villeurbanne*, *Développement-Pasteur*, *IBDC-Nice*, *IBDML-Marseille*, *IGD-Rennes*, *IJM-Paris*, *LBD-Paris*

– Croissance, métabolisme, contrôle hormonal : *BFA-Paris*, *CGM Gif/Yvette*, *IBDC-Nice*

– Épigenétique, chromatine, microARN : *CGMC-Lyon*, *Développement-Pasteur*, *GRD-Clermont-Ferrand*, *IBDML-Marseille*, *IGBCM-Strasbourg*, *IGH-Montpellier*, *IJM-Paris*, *LBD-Paris*

– Hématopoïèse et immunité : *CBD-Toulouse*, *CGM Gif/Yvette*, *IBDML-Marseille*, *RIDI-Strasbourg*

– Ontogénie et évolution du système nerveux (certains thèmes sont partagés avec les sections 24 et 27) : *CSGA-Dijon*, *IBDC-Nice*, *IGBMC-Strasbourg*, *IGH-Montpellier*, *LN-ESPCI-Paris*, *N&D-Gif/Yvette*

– Gamétogenèse, embryogenèse, morphogénèse, gènes homéotiques : *CBD-Toulouse*, *GReD-Clermont-Ferrand*, *IBDC-Nice*, *IBDML-Marseille*, *IJM-Paris*

– Myogénèse, cardiogénèse : *GReD-Clermont-Ferrand*, *IBDML-Marseille*

– Micro-évolution : *CBD-Toulouse*, *IBDML-Marseille*, *IJM-Paris*

La drosophile s'est par ailleurs imposée comme un modèle d'étude de pathologies humaines, en particulier grâce à la puissance des cribles d'interactions génétiques qui peuvent être mis en œuvre (*CBD-Toulouse*, *IBDML-Marseille*, *IGBMC-Strasbourg*, *IGH-Montpellier*, *IJM-Paris*).

La communauté drosophile française organise depuis 20 ans un colloque annuel qui réunit environ 130 participants. En 2010 : <http://www.drosophile2010.meeting.frsv.fr/>

Enfin il faut noter que le réservoir de jeunes chercheurs talentueux formés à la recherche sur le modèle drosophile est très important, permettant un essaimage fructueux dans de nombreuses disciplines.

## Nématode

Le nématode *Caenorhabditis elegans*, un petit ver terrestre choisi par S. Brenner comme modèle de génétique animale pour le petit nombre et le lignage invariant des cellules de l'individu adulte, est devenu un modèle populaire d'Evo-Devo dès le début des années 1980 sous l'impulsion de P. Sternberg et R. Horvitz qui ont décidé d'étudier la base génétique des différences morphologiques et de lignages cellulaires entre espèces proches de nématodes (micro-évolution). En France, les nématodes ont été surtout l'objet d'études taxonomiques jusqu'au renouveau de l'intérêt de ce modèle pour aborder des questions fondamentales de

biologie cellulaire et de développement. Un nombre croissant d'équipes utilisent *C. elegans* comme leur modèle d'étude principal, avec une forte composante d'imagerie *in vivo* liée à la transparence de cet organisme; de nombreuses autres l'utilisent en complément d'autres modèles. Le nématode est utilisé par quelques équipes comme modèle d'étude de pathologies humaines (myopathies, pathologies neurodégénératives, vieillissement-longévité). La mise au point de techniques d'identification de mutants basées sur le séquençage à grand débit permet désormais le clonage de mutants en quelques jours et fait de *C. elegans* un modèle génétique puissant. D'autre part, le libre partage des réactifs et des informations, traditionnel dans cette communauté dynamique en pleine croissance (Andy Fire kits, wormbase, wormbooks, wormatlas, worm breeder gazette), ainsi que le constant développement d'outils (ARNi, manipulation du génome, etc.) et de banques (knock-out, protéomes, promotéomes, etc.) sont autant d'avantages de ce modèle en pleine expansion.

### Thèmes abordés :

– Morphogénèse, trafic intracellulaire : *CGM Gif/Yvette*, *IGBMC-Strasbourg*, *IGD-Rennes*

– Plasticité cellulaire, épigénétique : *IGBMC-Strasbourg*, *LBD-Paris*, *LBMC-Lyon*

– Division asymétrique et cycle cellulaire : *IGBMC-Strasbourg*, *IJM-Paris*

– Myogénèse, étude de pathologies humaines : *CGMC-Lyon*

– Micro-évolution : *IBDC-Nice*, *IJM-Paris*, *LBMC-Lyon*, *MNHN-Paris*

– Immunité : *CIML-Marseille*

– Mémoire sensorielle : *IBDML-Marseille*

– Programmes de régulation de l'expression génique : *IECB-Bordeaux*

– Neurobiologie/transmission synaptique : *IBENS-ENS Paris*

À l'initiative de Jonathan Ewbanks, la communauté *C. elegans* française se retrouve

lors d'une réunion annuelle, le « VerMidi », depuis 1997 (VerMidi 2010 : <http://www.ijm.fr/ijm/actualites/colloque-nematode/>).

## Poisson-zèbre

Ce petit poisson originaire des eaux du Gange s'est avéré un modèle d'étude puissant de biologie du développement. En effet, il présente de nombreux avantages sur le plan expérimental, dont l'accessibilité directe aux embryons, pondus en très grande quantité, la transparence de ses œufs permettant une analyse morphologique directe et rapide des phénotypes mutants générés par gain ou perte de fonction. La genèse de collections de mutants, largement développée et facilitée par le séquençage du génome, est efficacement complétée par la possibilité d'études de perte de fonction grâce à la technologie des morpholinos. La réalisation (par une équipe de l'IGBMC-Strasbourg ayant quitté la France il y a peu pour les USA), d'un crible d'hybridation *in situ* à haut débit financé par le NIH devant permettre d'identifier tous les gènes dont l'expression varie au cours du développement embryonnaire et de suivre leur expression dans l'embryon en 3 dimensions est un atout très important pour la recherche dans ce domaine. Autre point fort, le poisson-zèbre est un modèle très bien adapté à l'imagerie *in vivo*. Très récemment, des approches transdisciplinaires de traçage cellulaire *in vivo* en temps réel et d'imagerie cellulaire haute résolution, associant biologistes (N&D-Gif/Yvette), physiciens et mathématiciens, ouvrent la voie de l'analyse quantitative en 4-D des comportements cellulaires lors de l'embryogenèse précoce. En France, un nombre croissant d'équipes de recherche utilisent cet organisme comme modèle principal d'étude des processus du développement (ou de neurobiologie) ; quelques autres ont adopté le poisson-zèbre comme modèle complémentaire à d'autres modèles vertébrés pour répondre à des questions ponctuelles en s'affranchissant de la lenteur de la génétique des mammifères, ou évaluer la conservation des mécanismes. Il faut également noter que le modèle poisson-

zèbre a permis de développer des cribles à grande échelle pour la recherche de molécules d'intérêt pharmacologique en partenariat avec l'industrie (anticancéreux, ligands pour la famille des récepteurs nucléaires, test de molécules lipophiles, etc.). Enfin, il s'agit d'une référence incontournable pour aborder des questions de type Evo-Devo, notamment celles conduites à l'échelle de la microévolution chez des actinoptérygiens présentant des variations phénotypiques importantes entre populations vivant dans des habitats différents (ex : *Astyanax mexicanus*).

### Thèmes abordés :

- Hématopoïèse, myogénèse : *Développement-Pasteur, IGBMC-Strasbourg*
- Ontogénie et évolution du système nerveux : *CBD-Toulouse, Développement-Pasteur, LBD-Paris, N&D-Gif/Yvette, PMSNC-Paris*
- Organogenèse : *IBENS-ENS Paris*
- Embryogenèse précoce : *IBENS-ENS Paris, N&D-Gif/Yvette*
- Génomique et évolution : *IGBMC Strasbourg, IGFL-Lyon, N&D-Gif/Yvette*
- Développement cardiaque et influence des flux : *IGBMC-Strasbourg*

## Souris

Le modèle souris s'est imposé au fil des ans comme le modèle mammifère incontournable de génétique du développement, malgré des contraintes et des coûts d'élevage qui sont de plus en plus importants et qui doivent absolument être pris en compte. Un élément clef à l'origine des investissements considérables dans la génétique de la souris a été, au début des années 80, l'isolement et la culture de cellules embryonnaires pluripotentes (cellules souches embryonnaires ES) à partir d'embryons, 20 ans après la première mise en évidence de cellules souches hématopoïétiques capables de reconstituer l'hématopoïèse de souris irradiées. La culture de cellules ES a ouvert la possibilité de créer des souris

mutantes par recombinaison homologue et l'analyse dite génétique inverse de gènes du développement. En France, F. Jacob et ses collaborateurs à l'Institut Pasteur ont joué un rôle primordial dans le rapprochement entre génétique cellulaire et génétique du développement en partant de l'analyse d'antigènes de surface communs aux tératocarcinomes embryonnaires et aux cellules germinales dès le début des années 70. Cependant, contrairement aux autres modèles, la nature et le coût des investissements et méthodologies nécessaires ralentissent en France la progression de la génétique inverse de la souris et la mise en œuvre de cribles génétiques requis pour identifier des modificateurs de phénotypes. Depuis quelques années, malgré l'appui initial de fonds issus de compagnies pharmaceutiques et de programmes européens de grande envergure et à la politique de regroupement des investissements sur site unique (IFR, structures cependant amenées à disparaître), ce retard français ne se comble pas. On doit actuellement distinguer deux types de supports aux laboratoires utilisant le modèle souris : i) Les centres de transgénèse et génétique de dimension et à vocation européenne à Strasbourg (Clinique de la Souris, ICS) et Orléans (CDTA, malheureusement non-adossé à un centre de recherche performant sur le système murin) ; ii) Les plateformes ou services de transgénèse à vocation régionale voire locale qui jouent un rôle essentiel dans la formation des utilisateurs et le suivi des projets, mais qui souffrent de faiblesses en termes d'infrastructure et de moyens humains et financiers. Les investissements nécessaires aux animaleries et à l'analyse des phénotypes mutants, et la nécessité de comités de pilotage scientifique doivent être absolument pris en compte.

*Thèmes abordés :*

– Cellules souches, divisions cellulaires asymétriques, polarité planaire : *CGMC Lyon, CIRID-Bordeaux, Développement-Pasteur, IBDC-Nice, IGBMC-Strasbourg*

– Gamétogenèse, embryogenèse précoce, cycle cellulaire : *CBD-Toulouse, Développement-Pasteur, IGBMC-Strasbourg, IJM-Paris, LBD-Paris*

– Épигénétique, chromatine, microARN : *CBD-Toulouse, CEDC-Paris, CGMC-Villeurbanne, Développement-Pasteur, GBD-Curie Paris, IBENS-ENS-Paris, IGBMC-Strasbourg, LBMC-Lyon*

– Hématopoïèse : *Développement-Pasteur, IAL-Villejuif, IGBMC-Strasbourg, LBD-Paris*

– Ontogénie et évolution du système nerveux : *CEDC-Paris, CGMC-Lyon, IBDML-Marseille, IBENS-ENS Paris, IJM-Paris, INM-Montpellier, LBD-Paris, SNM-Curie-Orsay*

– Organogenèse, gènes homéotiques : *IGBMC-Strasbourg, IBDML-Marseille, LBD-Paris*

– Myogenèse, cardiogenèse : *Développement-Pasteur, IBDML-Marseille, IGBMC-Strasbourg, LBD-Paris*

**Poulet/caille**

Le modèle oiseau, modèle princeps d'embryologie expérimentale, a énormément contribué aux connaissances du développement embryonnaire. On ne peut omettre de citer la découverte de l'origine et du développement des lymphocytes B et T, ni bien sûr les expériences de lignage cellulaire réalisées sur des embryons chimères caille-poulet à l'Institut d'Embryologie Expérimentale de Nogent/ Marne sous la direction de N. Le Douarin, ayant permis de réaliser l'importance, sur le plan évolutif et fonctionnel des crêtes neurales dont l'apparition coïncide avec l'émergence des vertébrés. Actuellement, le modèle oiseau est largement utilisé de manière complémentaire aux modèles vertébrés qui autorisent une analyse génétique, comme la souris et le poisson zèbre. Alors que le génome du poulet est maintenant complètement séquencé, il est essentiel que les compétences et concepts issus en particulier de l'école de Nogent/ Marne continuent d'être exploités et transmis.

*Thèmes abordés :*

– Cellules souches : *IGFL-Lyon, LBD-Paris, U3B-Nantes*

– Hématopoïèse : *LBD-Paris, IAF-Villejuif*

– Ontogénie et évolution du système nerveux : *CBD-Toulouse*, *CDC-Curie Paris*, *IBENS-ENS Paris*, *LBD-Paris*, *N&D-Gif/Yvette*, *SNM-Curie-Orsay*

– Organogenèse : *LBD-Paris*, *IAB-Grenoble*

– Myogenèse : *IBDML-Marseille*, *IGBMC-Strasbourg*, *LBD-Paris*, *U3B-Nantes*

## Xénope

L'amphibien est un autre modèle princeps d'embryologie expérimentale. Il a permis l'émergence des grandes questions de base de l'embryologie, comme la notion d'induction neurale mise en évidence en 1924 par H. Spemann et H. Mangold. Le xénope (*Xenopus laevis*), incontournable pour la facilité de manipulation qu'offrent l'œuf et l'embryon précoce, est un modèle d'étude de nombreuses équipes du CNRS. Les approches de perte-de-fonction par la technologie des morpholinos anti-sens ou de surexpression sont aisées à réaliser via la micro-injection dans des blastomères individuels à différents stades des premières étapes de segmentation. Une caractéristique originale à ce modèle réside dans la technique des « animal cap », basée sur l'excision et la mise en culture du toit du blastocœle de la blastula. La force de l'animal cap réside dans sa possibilité d'être diverti de son destin épidermique spontané vers d'autres destinées suite à des traitements appropriés. On peut ainsi provoquer l'organogenèse *in vitro* de dérivés ectodermiques, mésodermiques ou endodermiques, qui sont physiologiquement fonctionnels et greffables, autorisant une analyse intégrative non-limitée à l'apparition de quelques marqueurs. Plus récemment, le développement de l'espèce *Xenopus tropicalis* (diploïde contrairement à *X. laevis*, 5 mois pour l'acquisition de la maturité sexuelle contre 2 ans pour *X. laevis*) ouvre la perspective d'approches de génétique et de génomique fonctionnelle. Il est primordial que les équipes françaises continuent d'être associées à l'analyse et l'assemblage de son génome (dont la première version de séquençage a été publiée dans la revue Science en 2010,

incluant la participation d'une équipe CNRS du Génomipole d'Évry) ainsi qu'au développement de la transgénèse chez cette espèce dont le temps de génération et la carte chromosomique permettent d'envisager l'établissement de collections de souches mutantes. Le xénope est également utilisé comme modèle d'étude des cellules souches neurales, et en particulier des cellules souches neurales rétiniennes. En outre, l'ovocyte de xénope demeure un modèle de référence pour l'étude du contrôle moléculaire des divisions méiotiques, un processus charnière entre reproduction et développement qui, outre son intérêt intrinsèque, sert de paradigme à l'étude du cycle mitotique.

### Thèmes abordés :

– Gamétogenèse, embryogenèse précoce, cycle cellulaire : *CBD-Toulouse*, *CRBM-Montpellier*, *IGD-Rennes*, *LBD-Paris*

– Organogenèse, métamorphose, contrôle hormonal : *CDC-Curie Paris*, *CIRID-Bordeaux*, *IJM-Paris*, *IAL Villejuif*, *LBD-Paris*, *MNHN-Paris*, *ICM-Rennes*, *IGD-Rennes*, *SNM-Curie-Orsay*

– Épigénétique, chromatine : *IGH-Montpellier*, *DNPG-Curie Paris*

– Ontogénie du système nerveux : *CBD-Toulouse*, *N&D-Gif/Yvette*

Génomique fonctionnelle, Centre de ressources génomiques et d'animaux transgéniques : Orsay (<http://www.ifr144.u-psud.fr/Transgenese-Amphibiens>) et Rennes (<http://xenopus.univ-rennes1.fr/>). Réunions scientifiques : La communauté « amphibiens » française organise tous les deux ans un colloque qui réunit une soixantaine de participants. Un « Club amphibien Ile-de-France » avec des réunions mensuelles a été créé en 2004 : *Xénop'arisien* (<http://www.umr8080.u-psud.fr/xenoparisien.html>).

## Ascidies (Urochordés)

Depuis les expériences pionnières d'embryologie expérimentale de Chabry au

XIX<sup>e</sup> siècle, les embryons d'ascidies ont représenté un matériau de choix des embryologistes de par la simplicité (un têtard de 3 000 cellules se développe en douze heures) et l'aspect « mosaïque » du développement (les 24 cellules musculaires sont déjà prédéterminées dans l'œuf). Le séquençage du génome de l'espèce *Ciona intestinalis* en 2003, la description des réseaux de gènes impliqués dans la différenciation des six tissus de l'embryon et la production d'animaux transgéniques et mutants témoignent de l'intérêt grandissant des laboratoires pour ce modèle. Les équipes françaises (Villefranche/Mer, Marseille, Gif/Yvette) occupent une excellente place sur le plan international, à côté des universités japonaises. Le « 4th International Tunicate Meeting » a été organisé à Villefranche/Mer en 2007 (<http://biodev.obs-vlfr.fr/tunicatemeeting/>). Il est à noter que parmi les appendiculaires, urochordés qui constituent une partie importante de la biomasse océanique, l'espèce *Oikopleura dioica* (cycle de vie complet 6 jours) dont le génome de taille réduite est en passe d'être entièrement séquencé, fait l'objet d'un nombre croissant d'études. Documents d'imagerie : <http://biodev.obs-vlfr.fr/recherche/biomarcell/>

*Thèmes abordés :*

– Gamétogenèse, Embryogenèse précoce, cycle cellulaire, apoptose : *BioDev-Villefranche/Mer, ISE-Montpellier*

– Ontogénie du système nerveux : *IBDML-Marseille, IBENS-ENS Paris, N&D-Gif/Yvette*

**Oursins**

De par l'abondance de ses œufs et leur facilité à être fécondés et à se développer de façon synchrone, l'oursin a contribué depuis le XIX<sup>e</sup> siècle à nos connaissances sur les concepts d'information chromosomique, de polarité embryonnaire et d'induction, d'activation du développement par le spermatozoïde, de réseaux de gènes et des composants du cycle cellulaire. Le génome de l'espèce *Strongylocentrotus purpuratus* est entièrement séquencé. Notons qu'après une période très fructueuse

et en dépit d'une situation très adaptée à son utilisation (stations marines de Banyuls et Roscoff), l'utilisation de l'ovocyte d'Étoile de mer, un modèle approprié à l'étude du contrôle de la méiose, complémentaire des modèles souris et xénope, a été abandonné en France (alors qu'il est en pleine expansion au Japon et aux USA, et que le génome est en cours de séquençage).

*Thèmes abordés :*

– Gamétogenèse, embryogenèse précoce, cycle cellulaire : *BioDev-Villefranche/Mer, BIOM-Banyuls, MS-Roscoff, N&D-Gif/Yvette*

**1.2 APPROCHES EVO-DEVO : PRINCIPAUX MODÈLES**

***Clytia hemisphaerica***

L'étude des éponges, cténaïres et cnidaires s'avère actuellement d'un intérêt majeur pour comprendre l'origine des grandes caractéristiques des bilatériens (polarités) et celle de leurs grands types cellulaires. Ce domaine est actuellement marqué par la percée spectaculaire du modèle *Clytia hemisphaerica* (*BioDev-Villefranche/Mer, SAE-Paris*) pour les études de biologie du développement et d'évolution. Contrairement aux deux espèces dont le génome est séquencé (*Nematostella* et *Hydra*), *Clytia* possède une phase méduse libre dotée d'une organisation complexe (muscles striés, système nerveux, organes sensoriels et reproducteurs). L'investissement de deux équipes (*BioDev-Villefranche/Mer, SAE-Paris*) a permis d'établir que ce modèle d'intérêt pour sa position phylogénétique est approprié à l'expérimentation (microinjections, imagerie, cultures en aquarium...) et a déjà livré des données concernant l'origine de la polarité embryonnaire, des cellules neurosensorielles (nématocystes) et le contrôle des divisions méiotiques. Ce modèle a donc des atouts considérables pour s'imposer comme référence dans le taxon. Le séquençage de son génome est actuellement engagé au Géo-

scope. D'autres modèles actuellement moins avancés du point de vue expérimental mais présentant également un intérêt majeur pour leur position phylogénétique (*Pleurobrachia pileus*, cténaire; *Oscarella lobularis*, spongiaire) pourraient également contribuer de façon significative à la caractérisation moléculaire et cellulaire du dernier ancêtre commun des métazoaires.

*Thèmes abordés :*

– Origine des polarités, origine des cellules neuro-sensorielles, contrôle de la méiose : *BioDev-Villefranche/Mer*, *DIMAR-Marseille*, *SAE-Paris*

### **Platynereis dumerilii**

L'annélide *P. dumerilii* s'est imposé comme modèle d'Evo-Devo de référence chez les lophotrochozoaires (qui comprennent également les mollusques et les plathelminthes). L'intérêt de cette espèce est qu'elle a conservé un nombre important de caractéristiques anatomiques, développementales et génomiques perdues chez les modèles traditionnels des protostomiens (drosophile et nématode). Son étude contribue donc de façon significative à notre compréhension des caractéristiques du dernier ancêtre commun des bilatériens. Ce modèle est actuellement porté par une collaboration de haut niveau entre une équipe française (*IJM-Paris*) et une équipe de l'EMBL, qui ont résolu les problèmes d'élevage et développé une batterie d'approches fonctionnelles dont la génération de morphants. D'autres modèles annélides méritent également d'être cités, comme la sangsue (*LNA-Lille*) ainsi que des modèles plus atypiques d'annélides des grands fonds permettant d'apprécier les effets de fortes pressions sur le développement (*SAE-Paris*). Notre compréhension de l'origine des bilatériens pourrait enfin bénéficier de modèles actuellement en développement, comme l'acoèle *Symsagittifera roscoffensis* (*SBR-Roscoff*) ou la seiche *Sepia officinalis* (*MNHN-Paris*).

### **Amphioxus (Céphalochordés)**

De par sa place phylogénétique, l'amphioxus, un céphalochordé proche parent des vertébrés et considéré comme un ancêtre des chordés, est le maillon essentiel pour comprendre l'évolution des chordés. Son plan d'organisation et son génome (séquencé) sont de type «vertébré», mais en version simplifiée (peu de duplications par exemple, par rapport aux gènes vertébrés). Jusqu'à récemment, les études sur l'amphioxus étaient rendues difficiles par la disponibilité uniquement saisonnière des embryons, dont l'origine était l'Océan Atlantique au large de la Floride (*Branchiostoma floridae*). Un élevage d'amphioxus (*Branchiostoma lanceolatum*) unique au plan international a été installé à la station marine de Banyuls. Il permet d'étudier toutes les étapes du développement de l'œuf à la métamorphose. Cet élevage a permis à plusieurs équipes du CNRS de contribuer aux études sur ce modèle clef de l'évolution. De nombreux verrous technologiques ont été levés ces dernières années sur l'espèce méditerranéenne : possibilité d'induire les pontes en aquarium et de collecter des embryons quotidiennement pendant les quatre mois de la saison de reproduction, microinjections, hybridation *in situ*, immunolocalisation et imagerie *in vivo*... Ceci explique le plein essor du modèle, pour lequel plusieurs équipes du CNRS exercent un leadership à l'échelle internationale.

*Thèmes abordés :*

– Embryogenèse précoce, évolution des réseaux de signalisation : *BIOM-Banyuls*, *Développement-Pasteur*, *N&D-Gif/yvette*

– Évolution des récepteurs nucléaires : *IGFL-Lyon*

– Ontogénie du système nerveux : *N&D-Gif/yvette*

### **Petromyzon marinus**

La lamproie *Petromyzon marinus* est actuellement l'organisme modèle de référence

chez les cyclostomes, groupe frère des vertébrés à mâchoires. Sa position phylogénétique et ses caractéristiques morphologiques et physiologiques considérées comme primitives chez les vertébrés en font une espèce d'un intérêt majeur pour comprendre l'origine des grandes caractéristiques de ce taxon clef. Avec un développement de type amphibien, elle se prête aux approches moléculaires et fonctionnelles (hybridation *in situ*, immunohistochimie, microinjections) et elle suscite un fort intérêt au plan international. Plusieurs équipes du CNRS ont joué un rôle pionnier dans son établissement. De par les développements en cours, notamment ceux qui visent à s'affranchir du caractère saisonnier de la reproduction, ces équipes sont actuellement les mieux placées pour s'imposer comme leaders à l'échelle européenne.

*Thèmes abordés :*

- Embryogenèse précoce, latéralisation du cerveau antérieur : *MS-Roscoff*
- Évolution des acteurs de la voie acide rétinienne : *IGFL-Lyon*
- Évolution du patterning du cerveau antérieur : *N&D-Gif/Yvette*

**Scyliorhinus canicula**

La petite rousette *S. canicula* appartient à la plus grande famille de requins vivant actuellement. Elle présente toutes les grandes caractéristiques morphologiques des gnathostomes (vertébrés à mâchoire) et possède des organes sensoriels et des systèmes physiologiques remarquablement élaborés. En tant que chondrichthyen, elle détient une position phylogénétique clef pour caractériser l'état ancestral des gnathostomes et comprendre les changements moléculaires associés à leurs innovations, ainsi que pour identifier les divergences génomiques et mécanistiques intervenues aux nœuds clefs du taxon. Les efforts pionniers réalisés par les équipes et services du CNRS pour développer les productions d'œufs, des bases de données moléculaires ainsi que des approches expérimentales ou

fonctionnelles font de cette espèce le seul modèle expérimental chondrichthyen et les mettent en position de leader international dans le domaine.

*Thèmes abordés :*

- Embryogenèse précoce, évolution du cerveau antérieur : *MS-Roscoff*
- Évolution des gènes Hox, origine des dents et des appendices pairs : *LEGS-Gif/Yvette*
- Reconstruction du génome ancestral des gnathostomes : *MS-Roscoff, IBENS-ENS-Paris*

**Autres modèles en émergence : plantes, algues, protistes**

La génétique du développement est également en plein essor chez des modèles de mousse et macro-algues impliquant des équipes (*VMB-Roscoff, BVME-Marseille*) en position de leader au plan international (algue rouge *Chondrus crispus*; mousse *Physcomitrella patens*; algue brune *Ectocarpus siliculosus* avec des collections de mutants disponibles et des approches fonctionnelles en cours de développement chez ces deux dernières espèces). Des équipes du CNRS (*BIOM-Banyuls*) sont également fortement impliquées dans l'étude d'organismes unicellulaires (protistes, choanoflagellés, pico-algues comme *Ostreococcus*). L'étude de ces espèces est fondamentale pour notre compréhension de l'origine et de l'évolution précoce des eucaryotes en général et/ou des métazoaires ou plantes vertes, celle par exemple de l'origine de la multicellularité.

**2 – REPRODUCTION**

Les recherches sur la reproduction sont au centre des préoccupations de la section 26. La reproduction sexuée assure la perpétuation de l'espèce et constitue le « moteur » de l'évolution, par le brassage des allèles et l'émergence

d'individus adaptables aux nouvelles conditions de leur environnement. Il existe cependant un décalage entre l'importance fondamentale de cette fonction pour le vivant et l'état des connaissances et le niveau d'organisation de la recherche française dans ce secteur. Les progrès importants réalisés dans le domaine de la reproduction au cours des cinquante dernières années, aussi bien au niveau fondamental (contrôles neuro-endocriniens et endocriniens du fonctionnement des gonades, déterminisme du sexe, différenciation des gamètes), qu'au niveau des applications, ne doivent pas masquer les lacunes importantes qu'il reste à combler. La biologie de la reproduction mérite d'être mieux soutenue par le CNRS, dans la mesure où elle aborde de grandes questions biologiques fondamentales et non-résolues et représente un enjeu socio-économique important.

## 2.1 DOMAINES DE RECHERCHES

### Détermination du sexe, développement gonadique et régulation

L'identification des gènes dont l'expression s'effectue en amont et en aval du/des gène(s) de détermination sexuelle et qui assurent la mise en œuvre de la cascade moléculaire responsable du développement gonadique ainsi que le contrôle éventuel de leur expression par les facteurs du milieu extérieur font l'objet d'une forte compétition internationale et représentent un objectif de toute première importance. Une meilleure connaissance de l'évolution phylogénétique des déterminants génétiques du sexe aidera à mieux comprendre le mécanisme de cette détermination.

La physiologie des gonades embryonnaires, très différente de celle des gonades adultes, nécessite des études spécifiques. Alors que la gamétogenèse foetale ou larvaire constitue une étape cruciale pour la mise en place des cellules germinales souches, cette fonction reste très peu connue. Les progrès

dans le domaine dépendront de la caractérisation moléculaire des cellules germinales embryonnaires et de leur environnement somatique, en privilégiant la variété des modèles utilisés, vertébrés ou invertébrés, et le développement de méthodes d'étude spécifiques. Les caractéristiques de certains modèles particuliers sont intéressantes à prendre en compte : hermaphrodisme simultané (*C. elegans*), ou successif (mollusques, poissons), rôle physiologique majeur des stéroïdes sexuels par rapport au sexe génotypique (poissons, reptiles), influence des facteurs naturels ou xénobiotiques de l'environnement (poissons). Certains de ces modèles peuvent aussi, par l'obtention d'individus gynogénétiques ou androgénétiques viables et féconds, permettre des expérimentales originales potentiellement riches d'enseignements.

Laboratoires liés au CNRS développant ces thèmes : *BDR-Jouy*, *GDNP-Nice*, *IGFL-Lyon*, *IGH-Montpellier*

### Contrôles cellulaires et moléculaires de la gamétogenèse et de la fécondation

L'élaboration des ovocytes et des spermatozoïdes et leur aptitude à se rencontrer pour générer un embryon puis *in fine* un adulte viable et fécond, sont des éléments fondamentaux de la fonction de reproduction. Les efforts développés doivent inclure des recherches sur la compréhension des mécanismes initiaux de constitution et de renouvellement des stocks de cellules souches, de la différenciation des cellules germinales, de la méiose et de la maturation finale des cellules germinales et des follicules.

Il existe un continuum entre différenciation de la gonade, première gamétogenèse (puberté chez les mammifères), et gamétogenèse adulte : les cellules germinales souches et les cellules somatiques spécialisées mises en place durant l'ontogenèse de la gonade conditionnent la gamétogenèse future. Chez les mammifères, la phase pré-pubertaire est aussi critique avec la multiplication, chez le mâle,

des cellules de Sertoli qui vont supporter la gamétogenèse. Il est donc important d'avoir une approche incluant des modèles variés et un continuum temporel « embryon, larve/foetus, adulte » pour mieux appréhender les régulations de la survie, du renouvellement et de la différenciation des cellules germinales. Dans l'état actuel, cette recherche reste trop fragmentée au sein de laboratoires distants, dépendant souvent de tutelles distinctes, ce qui ne facilite pas forcément leur mise en réseau.

L'étude des divisions méiotiques de la cellule germinale femelle reste un domaine actif développé par plusieurs équipes du CNRS. Le processus est central en physiologie de la reproduction, puisqu'il assure la genèse d'un gamète fécondable et détermine la « qualité » du futur embryon : localisation appropriée de déterminants maternels, contrôle de la ploïdie... Les divisions méiotiques utilisent les acteurs moléculaires de la division mitotique, mais des voies de régulation originales à la cellule germinale divertissent ces acteurs de leur fonction habituelle dans la cellule somatique mitotique pour produire l'enchaînement particulier des deux divisions méiotiques. C'est pourquoi l'étude des divisions ovocytaires est également poursuivie par nombre de chercheurs pour les enseignements qu'elle livre sur les mécanismes de la mitose. L'étude de ce processus bénéficie de l'utilisation de modèles complémentaires : souris, xénope, ascidie, oursin (sur le plan de l'activation ovocytaire et de la fécondation) et récemment la méduse *Clytia* (à noter l'arrêt des études sur le modèle Étoile de mer, malgré l'intérêt du modèle et le succès des travaux). Cette petite communauté, dispersée dans différents laboratoires du CNRS, est soudée comme en témoignent des publications communes régulières, et très visible internationalement.

L'étude des processus conditionnant le développement précoce post-fécondation nedoivent pas occulter la contribution maternelle présente dans l'ovocyte sous forme d'ARN messagers qui vont conditionner le bon déroulement des phases très précoces de l'embryogenèse. À ce titre, l'étude des proces-

sus d'accumulation/dégradation et d'adénylation/déadénylation des ARN maternels de l'ovocyte et des mécanismes régulant leur localisation intracellulaire, méritent d'être soutenues. Les vertébrés (souris, xénope, poisson-zèbre...) et plusieurs invertébrés (drosophile, nématode...) constituent des modèles expérimentaux utiles pour ces analyses fonctionnelles.

Les contrôles paracrines de la gamétogenèse, incluant les dialogues entre cellules germinales et cellules somatiques, constituent également un point essentiel des études à mener dans le domaine, et là encore, le recours à des modèles variés, souvent plus propices à l'expérimentation que les modèles murins, est essentiel.

Laboratoires liés au CNRS développant ces thèmes : *BioDev-Villefranche/Mer*, *BIOM-Banyuls*, *CGM-Gif/Yvette*, *CRBM-Montpellier*, *GREd-Clermont-Ferrand*, *IAB-Grenoble*, *IBDC-Nice*, *IGBMC-Strasbourg*, *IGH-Montpellier*, *IJM-Paris*, *ING-Grenoble*, *LBD-Paris*, *MS-Roscoff*

## Contrôles endocrines

Chez les vertébrés, les hormones glycoprotéiques hypophysaires, FSH et LH, contrôlent les fonctions gamétogénétiques et les fonctions endocrines des gonades. Leurs sécrétions coordonnées sont elles-mêmes sous le contrôle de GnRHs et de facteurs endocrines gonadiques. L'origine et la régulation de la sécrétion des GnRHs hypothalamiques ainsi que les réceptivités des cellules gonadotropes à ceux-ci sont mal connues chez de nombreux taxons alors qu'elles interviennent de façon déterminante à plusieurs stades de la reproduction (puberté et arrêts saisonniers ou *post-partum*, ovulation, gamétogenèse...). Les systèmes neuronaux centraux responsables du contrôle de l'activité des neurones à GnRH, et assurant l'intégration des signaux environnementaux (photopériode, facteurs sociaux...) ou endogènes impliqués dans la régulation de la reproduction sont encore très mal connus. La connaissance des mécanismes moléculaires régulant la synthèse des hormo-

nes gonadotropes dans l'hypophyse, la compréhension des relations entre la structure de ces hormones et leurs propriétés biologiques et immunologiques, de même que les mécanismes moléculaires de leur action sur les cellules cibles gonadiques, demeurent également des objectifs cruciaux. Les mécanismes de rétro-contrôles assurés par les stéroïdes d'origine gonadique sont également encore loin d'être connus. Enfin, les recherches dans le domaine sont largement focalisées sur les vertébrés supérieurs. L'étude du contrôle endocrine de la fonction gonadique chez les vertébrés inférieurs ou dans différents modèles invertébrés (drosophile, nématode par exemple) serait pourtant une source enrichissante quant aux différents scénarios mis en place dans le vivant pour assurer la pérennité de cette fonction essentielle.

Laboratoires liés au CNRS développant ces thèmes: *BIOM-Banyuls, BFA-Paris, BOREA-Paris, GRd-Clermont-Ferrand, IGBMC-Strasbourg, PMSNC-Paris, PRC-Nouzilly*

### **Le contrôle épigénétique de la reproduction et la reprogrammation des génomes**

Les processus épigénétiques impliqués dans la reprogrammation des génomes, tels que le remodelage de la chromatine, la méthylation de l'ADN et l'empreinte parentale, les modifications des histones et les processus macroépigénétiques (organisation et localisation nucléaires des gènes) ont un rôle important, voire essentiel, dans le contrôle de l'expression génique. Ces modifications épigénétiques prennent place principalement au cours de deux périodes critiques: l'élaboration des gamètes et le développement embryonnaire et foetal/larvaire. Différents modèles tels la souris, le xénope ou la drosophile sont appropriés à l'étude de ces processus.

Laboratoires liés au CNRS développant ces thèmes: *BDR-Jouy, Cochin-Paris, DNPG-Curie Paris, GBD-Curie, GDNP-Nice, IGBMC-Strasbourg, IGH-Montpellier*

## **2.2 ATOUTS ET FAIBLESSES**

- Existence d'équipes de pointe ou/et reconnues internationalement.
- Existence de réseaux thématiques pluridisciplinaires et multi-organismes.
- Trop grande dispersion des équipes compromettant leur lisibilité et leur attractivité. Le contrôle de la fonction de reproduction fait l'objet d'études par des Unités CNRS dont ce n'est pas le thème majeur affiché, d'où un déficit de visibilité par rapport à l'INRA ou l'INSERM.
- Absence de continuité dans les orientations stratégiques et dans le soutien des programmes de recherche alors que certains d'entre eux traitent de problématiques à long terme.
- Dispositions législatives et réglementaires limitant trop strictement la recherche sur les cellules embryonnaires et l'embryon humain.

## **2.3 ORIENTATIONS ET PRIORITÉS**

### **Assurer une étude longitudinale et confronter les modèles**

La gamétogenèse représente une étape de différenciation cellulaire extrêmement conservée dans ses processus les plus fondamentaux. Pourtant, la reproduction est riche d'une grande variété de modes de régulation, avec pratiquement autant de modes de contrôle (à tous niveaux: détermination du sexe, gamétogenèse, mode de reconnaissance des gamètes, comportements, régulation endocrine et neuroendocrine...) que d'espèces. Il s'agit d'une fonction intégrée du vivant qui doit donc être abordée selon une approche longitudinale (des gamètes à l'organisme reproducteur) en prenant en compte la diversité de ses modalités dans le monde du vivant. Le développement récent des outils d'analyse liés à la connaissance des génomes et de leur expression (transcriptome, protéome, méta-

bolome, bio-informatique) incite à identifier plusieurs approches inter-espèces dans le champ de la reproduction de manière à créer des synergies fondamentales et appliquées.

### **Assurer une meilleure visibilité aux équipes travaillant dans le domaine**

Les forces du CNRS dans ce domaine de la Reproduction sont assez inégales. Il existe des équipes de pointe ou/et reconnues internationalement en ce qui concerne :

- la détermination du sexe sur des modèles mammifères (souris, ovins : *GDNP-Nice*, *IGH-Montpellier*, *BDR-Jouy*),

- les événements de la maturation de l'œuf et l'étude du contrôle de la méiose dans différents animaux modèles dont la souris, le xénope et certains invertébrés marins qui offrent une excellente accessibilité à l'expérimentation (*BioDev-Villefranche/Mer*, *CRBM-Montpellier*, *LBD-Paris*),

- les événements tardifs de la maturation gamétique mâle (*GReD-Clermont-Ferrand*, *IGBMC-Strasbourg*, *PRC-Nouzilly*),

- les événements de la différenciation placentaire (*Institut Cochin-Paris*),

- les contrôles neuro-endocrines et endocrines de la fonction gonadique (*BFA-Paris*, *BOREA-Paris*, *GReD-Clermont-Ferrand*, *IGBMC-Strasbourg*, *PRC-Nouzilly*).

Curieusement, de nombreuses équipes CNRS étudiant l'ontogenèse des gonades, l'organisation intracellulaire des ovocytes ou le contrôle des divisions méiotiques dans une grande variété de modèles ne perçoivent pas leurs travaux comme émergeant à la physiologie de la reproduction et se sont spontanément intégrées aux communautés des biologistes du développement ou des biologistes cellulaires. Sans remettre en question ces interactions fructueuses ni déraciner culturellement ces chercheurs, il serait particulièrement enrichissant qu'ils se maillent davantage avec les physiologistes de la reproduction, plutôt regroupés sur des questionnements de contrôles endocrines

de la fonction étudiés chez les vertébrés supérieurs, tant le continuum scientifique est évident. Il faut identifier les équipes travaillant dans le domaine, promouvoir leurs interactions et soutenir celles qu'elles ont pu développer ainsi que les encourager à adopter un intitulé « reproduction » visible. Dans ce sens, les opérations en cours ou en projet visant à la création et au regroupement de plusieurs bonnes équipes dans ce domaine (Clermont-Ferrand, Université Paris VII par exemple), devraient être appuyées par le CNRS.

### **Promouvoir les interactions entre biologie intégrative et fondamentale d'une part et recherche appliquée d'autre part**

Il est important d'exploiter la capacité des équipes françaises des différents organismes de recherche à développer des projets intégrés en s'appuyant sur la complémentarité des modèles animaux et de l'espèce humaine. En France, les recherches dans le domaine de la reproduction sexuée sont dispersées entre les organismes de recherche fondamentale (CNRS, Universités, Muséum National d'Histoire Naturelle) ou plus finalisée (INRA, INSERM, CEA ou encore IFREMER). Des compétences fortes dans les domaines du contrôle de la reproduction sont présentes à l'INSERM (détermination du sexe, pathologies de la reproduction et reproduction médicalement assistée) et l'INRA (axe gonadotrope et clonage reproductif). Au sein de l'Alliance Aviesan, l'ITMO BCDE (Biologie cellulaire, Développement, Évolution) devrait jouer un rôle fédérateur essentiel pour assurer la cohésion des recherches menées aux plans fondamentaux et appliqués au sein des différents organismes.

## **3 – CELLULES SOUCHES**

Les cellules souches sont à la base de l'édification de tout organisme. Elles possèdent

la particularité unique de se différencier dans tous les types cellulaires et, dans le même temps, de se renouveler identiques à elles mêmes ce qui en fait une source infinie de cellules. Outre les cellules souches hématopoïétiques (CSH) issues de la moelle osseuse et les cellules souches embryonnaires pluripotentes (cellules ES), les cellules souches identifiées à partir d'autres tissus embryonnaires ou adultes sont étudiées dans une double perspective de recherche fondamentale et d'applications thérapeutiques fondant la médecine régénératrice. Enfin, les recherches sur les mécanismes de la reprogrammation cellulaire, qui permettent de convertir une cellule différenciée en un autre type cellulaire ou même en cellule pluripotente, représentent un autre enjeu fort de la prochaine décennie. Cependant, la biologie des cellules souches reste encore peu comprise et une recherche fondamentale de haut niveau, appuyée sur des organismes modèles, est indispensable si l'on souhaite percer plus avant les mystères de ces cellules si particulières : régulation génétique et épigénétique de leur destin et de leur fonctionnement, localisation intra-tissulaire, interactions avec leur microenvironnement, notion de niche, continuum des stocks embryonnaires et adultes. À la différence de nos voisins européens, la recherche sur les cellules souches en France est peu organisée : peu d'affichage, de regroupements d'équipes sous forme d'Instituts ou de Départements, encore peu de filières universitaires d'enseignement du domaine. Le CNRS doit appuyer les efforts de structuration qui émergent. L'étude de l'origine et des propriétés des cellules souches neurales adultes mobilise un nombre considérable d'équipes au plan national comme international. Des équipes françaises ont récemment apporté des contributions majeures sur l'origine des cellules souches musculaires chez les vertébrés. En parallèle, la caractérisation des cellules souches intestinales a été entreprise par plusieurs équipes du CNRS, sur des modèles vertébrés et invertébrés. Enfin, les débats sur l'origine embryonnaire des CSH chez les vertébrés, un domaine où les équipes du CNRS sont en pointe, et sur les modes de communication

entre les CSH et leur micro-environnement (niche) ne sont pas clos alors que se dessinent les prémisses d'études de l'origine évolutive des CSH sur des modèles invertébrés. Le nombre de publications récentes sur les propriétés des cellules souches identifiées dans différents modèles animaux témoigne de l'effervescence des recherches sur ces cellules. Le CNRS doit être attentif à renforcer son potentiel dans ce domaine.

À noter que le CNRS doit veiller à ce que les règles administratives d'utilisation des cellules souches et des vecteurs viraux n'entravent pas le travail des équipes par trop de contraintes stériles.

#### *Thèmes abordés :*

– Cellules ES : *CIRID-Bordeaux, IBDC-Nice, IGBMC-Strasbourg, IGFL-Lyon*

– Cellules souches hématopoïétiques : *CBD-Toulouse, CIRID-Bordeaux, Développement-Pasteur, IAL-Villejuif, Institut-Cochin-Paris, LBD-Paris*

– Cellules souches musculaires : *Développement-Pasteur, IBDML-Marseille, IGBMC-Strasbourg*

– Cellules souches neurales : *CEDC-Paris, IBDML-Marseille, IGBMC-Strasbourg, N&D-Gif/Yvette*

– Cellules souches intestinales : *CDC-Curie Paris, Développement-Pasteur*

– Mécanismes de la reprogrammation : *IGBMC-Strasbourg*

## 4 – QUELQUES AVANCÉES RÉCENTES DANS LES DOMAINES DE LA BIOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT, DE L'ÉVOLUTION, DE LA REPRODUCTION ET DES CELLULES SOUCHES

Quelques articles de référence (originaux ou revues) co-signés par des chercheurs CNRS de la section 26.

*Apports des nouvelles technologies d'imagerie et de séquençage à haut débit*

Cell lineage reconstruction of early zebrafish embryos using label-free nonlinear microscopy. Olivier N, Luengo-Oroz MA, Duloquin L, Faure E, Savy T, Veilleux I, Solinas X, Débarre D, Bourguin P, Santos A, Peyriéras N, Beaurepaire E. *Science*. 2010 329 : 967-71.

Lighting up developmental mechanisms : how fluorescence imaging heralded a new era. Mavrakis M, Pourquie O, Lecuit T. *Development*. 2010 137 : 373-87.

A strategy for direct mapping and identification of mutations by whole genome sequencing. Zuryn S, Le Gras S, Jamet K, Jarriault S. *Genetics*. 2010 in press.

*Nouveaux modèles, Evo-Devo*

*Clytia hemisphaerica* : a jellyfish cousin joins the laboratory. Houliston E, Momose T, Manuel M. *Trends Genet*. 2010 26 : 159-67.

Insights into spawning behavior and development of the European amphioxus (*Branchiostoma lanceolatum*). Fuentes M, Benito E, Bertrand S, Paris M, Mignardot A, Godoy L, Jimenez-Delgado S, Oliveri D, Candiani S, Hirsinger E, D'Aniello S, Pascual-Anaya J, Maeso I, Pestarino M, Vernier P, Nicolas JF, Schubert M, Laudet V, Geneviere AM, Albalat R, Garcia Fernandez J, Holland ND, Escriva H. *J Exp Zool B Mol Dev Evol*. 2007 308 : 484-93.

Hedgehog signaling regulates segment formation in the annelid *Platynereis*. Dray N, Tessmar-Raible K, Le Gouar M, Vibert L, Christodoulou F, Schipany K, Guillou A, Zantke J, Snyman H, Béhague J, Vervoort M, Arendt D, Balavoine G. *Science*. 2010 329 : 339-42.

Genome analysis of the smallest free-living eukaryote *Ostreococcus tauri* unveils many unique features. Derelle E, Ferraz C, Rombauts S, Rouzé P, Worden AZ, Robbens S, Partensky F, Degroeve S, Echeynié S, Cooke R, Saeys Y, Wuyts J, Jabbari K, Bowler C, Panaud O, Piégu B, Ball SG, Ral JP, Bouget FY, Pignaneau G, De Baets B, Picard A, Delseny M, Demaille J, Van de Peer Y, Moreau H. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2006 103 : 11647-52.

A screen for neural development genes expressed in embryonic lampreys reveals trends for forebrain evolution in craniates. Guérin, Wincker P, Da Silva C, Mazan S, and Rétaux S. 2009. *PLoS ONE* 4, e5374.

The Ectocarpus genome and the independent evolution of multicellularity in brown algae. Cock JM, et al. *Nature*. 2010 465 : 617-21.

Plasticity and errors of a robust developmental system in different environments. Braendle C, Félix MA. *Dev Cell*. 2008 15 : 714-24.

Highly divergent gene expression programs can lead to similar chordate larval body plans. Sobral D, Tassy O, Lemaire P. *Curr Biol*. 2009 19 : 2014-9.

The causes of repeated genetic evolution. Gompel N, Prud'homme B. *Dev Biol*. 2009 332 : 36-47.

*Détermination des axes, induction neurale*

BMP inhibition initiates neural induction via FGF signaling and *Zic* genes. Marchal L, Luxardi G, Thomé V, Kodjabachian L. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2009 106 : 17437-42.

Patterning of the dorsal-ventral axis in echinoderms : insights into the evolution of the BMP-chordin signaling network. Lapraz F, Besnardeau L, Lepage T. *PLoS Biol*. 2009 7 : e1000248.

*Plasticité et destin cellulaires*

A *Caenorhabditis elegans* model for epithelial-neuronal transdifferentiation. Jarriault S, Schwab Y, Greenwald I. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2008 105 : 3790-5.

Transcriptional control of stem cell maintenance in the *Drosophila* intestine. Bardin AJ, Perdigoto CN, Southall TD, Brand AH, Schweisguth F. *Development*. 2010 137 : 705-14.

JNK signalling controls remodelling of the segment boundary through cell reprogramming during *Drosophila* morphogenesis. Gettings M, Serman F, Rousset R, Bagnerini P, Almeida L, Noselli S. *PLoS Biol*. 2010 8 : e1000390.

*Polarité cellulaire, polarité tissulaire et morphogénèse*

A random cell motility gradient downstream of FGF controls elongation of an amniote embryo. Bénazéraf B, Francois P, Baker RE, Denans N, Little CD, Pourquié O. *Nature*. 2010 466 : 248-52.

Closing in on mechanisms of tissue morphogenesis. Rauzi M, Lecuit T. *Cell*. 2009 137 : 1183-5.

Role of E-cadherin in membrane-cortex interaction probed by nanotube extrusion. Tabdanov E, Borghi N, Brochard-Wyart F, Dufour S, Thiery JP. *Biophys J*. 2009 96 : 2457-65.

A unique Extradenticle recruitment mode in the *Drosophila* Hox protein Ultrabithorax. Merabet S, Saadaoui M, Sambrani N, Hudry B, Pradel J, Affolter M, Graba Y. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2007 104 : 16946-51.

The RhoGAP RGA-2 and LET-502/ROCK achieve a balance of actomyosin-dependent forces in *C. elegans* epidermis to control morphogenesis. Diogon M, Wissler F, Quintin S, Nagamatsu Y, Sookhareea S, Landmann F, Hutter H, Vitale N, Labouesse M. *Development*. 2007 134 : 2469-79.

Zona pellucida domain proteins remodel the apical compartment for localized cell shape changes. Fernandes I, Chanut-Delalande H,

Ferrer P, Latapie Y, Waltzer L, Affolter M, Payre F, Plaza S. *Dev Cell*. 2010 18 : 64-76.

Dual mechanism controls asymmetric spindle position in ascidian germ cell precursors. Prodon F, Chenevert J, Hébras C, Dumolard R, Faure E, Gonzalez-Garcia J, Nishida H, Sardet C, McDougall A. *Development*. 2010 137 : 2011-21.

Jaw muscularization requires Dlx expression by cranial neural crest cells. Heude E, Bouhali K, Kurihara Y, Kurihara H, Couly G, Janvier P, Levi G. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2010 107 : 11441-6.

*Hématopoïèse, cellules souches hématopoïétiques, immunité*

Control of blood cell homeostasis in *Drosophila* larvae by the posterior signalling centre. Krzemień J, Dubois L, Makki R, Meister M, Vincent A, Crozatier M. *Nature*. 2007 446 : 325-8.

Blood stem cells emerge from aortic endothelium by a novel type of cell transition. Kissa K, Herbomel P. *Nature*. 2010 464 : 112-5.

Decoding the hemogenic endothelium in mammals. Dieterlen-Lièvre F, Jaffredo T. *Cell Stem Cell*. 2009 4 : 189-90.

The *Drosophila* systemic immune response : sensing and signalling during bacterial and fungal infections. Ferrandon D, Imler JL, Hetru C, Hoffmann JA. *Nat Rev Immunol*. 2007 7 : 862-74.

*Progéniteurs musculaires et cardiaques, cellules souches musculaires, myogénèse*

Skeletal muscle stem cells. Buckingham M, Montarras D. *Curr Opin Genet Dev*. 2008 18 : 330-6.

Bmp signaling at the tips of skeletal muscles regulates the number of fetal muscle progenitors and satellite cells during development. Wang H, Noulet F, Edom-Vovard F, Tozer S, Le Grand F, Duprez D. *Dev Cell*. 2010 18 : 643-54.

Endogenous retinoic acid regulates cardiac progenitor differentiation. Lin SC, Dollé P, Ryckebüsch L, Nosedà M, Zaffran S, Schnei-

der MD, Niederreither K. Proc Natl Acad Sci U S A. 2010 107 : 9234-9.

*Ontogénie et développement du système nerveux, cellules souches neurales*

A novel role for Dbx1-derived cajal-retzius cells in early regionalization of the cerebral cortical neuroepithelium. Griveau A, Borello U, Causeret F, Tissir F, Boggetto N, Karaz S, Pierani A. PLoS Biol. 2010 8 : e1000440.

A cross-disciplinary approach to understanding neural stem cells in development and disease. Henrique D, Bally-Cuif L. Development. 2010 137 : 1933-8.

Stemness or not stemness? Current status and perspectives of adult retinal stem cells. Locker M, Borday C, Perron M. Curr Stem Cell Res Ther. 2009 4 : 118-30.

Centralization of the deuterostome nervous system predates chordates. Nomaksteinsky M, Röttinger E, Dufour HD, Chettouh Z, Lowe CJ, Martindale MQ, Brunet JF. Curr Biol. 2009 19 : 1264-9.

Glial chain migration requires pioneer cells. Aigouy B, Lepelletier L, Giangrande A. J Neurosci. 2008 28 : 11635-41.

*Contrôle traductionnel et épigénétique du développement*

Maternal mRNA deadenylation and decay by the piRNA pathway in the early Drosophila embryo. Rouget C, Papin C, Boureux A, Meunier AC, Franco B, Robine N, Lai EC., Péliesson A and Simonelig M. 2010 Nature, in press.

Translational control of localized mRNAs : restricting protein synthesis in space and time. Besse F, Ephrussi A. Nat Rev Mol Cell Biol. 2008 9 : 971-80.

The endogenous siRNA pathway is involved in heterochromatin formation in Drosophila. Fagegaltier D, Bougé AL, Berry B, Poisot E, Sismeiro O, Coppée JY, Théodore L, Voinnet O, Antoniewski C. Proc Natl Acad Sci USA. 2009 106 : 21258-63.

Ephrin-B1 reverse signaling controls a posttranscriptional feedback mechanism via

miR-124. Arvanitis DN, Jungas T, Behar A, Davy A. Mol Cell Biol. 2010 30 : 2508-17.

The DUBle life of polycomb complexes. Schuettengruber B, Cavalli G. Dev Cell. 2010 18 : 878-80.

RNA-mediated non-mendelian inheritance of an epigenetic change in the mouse. Rassoulzadegan M, Grandjean V, Gounon P, Vincent S, Gillot I, Cuzin F. Nature. 2006 441 : 469-74.

Epigenetic inheritance during the cell cycle. Probst AV, Dunleavy E, Almouzni G. Nat Rev Mol Cell Biol. 2009 10 : 192-206.

*Contrôle de la méiose*

Spindle positioning in mouse oocytes relies on a dynamic meshwork of actin filaments. Azoury J, Lee KW, Georget V, Rassinié P, Leader B, Verlhac MH. Curr Biol. 2008 18 : 1514-9.

Redundant pathways for Cdc2 activation in *Xenopus* oocyte : either cyclin B or Mos synthesis. Haccard O, Jessus C. EMBO Rep. 2006 7 : 321-5.

Greatwall maintains mitosis through regulation of PP2A. Vigneron S, Brioude E, Burgess A, Labbé JC, Lorca T, Castro A. EMBO J. 2009 28 : 2786-93.

Conserved functions for Mos in eumetazoan oocyte maturation revealed by studies in a cnidarian. Amiel A, Leclère L, Robert L, Chevalier S, Houliston E. Curr Biol. 2009 19 : 305-11.

*Différenciation du sexe*

Activation of beta-catenin signaling by Rspo1 controls differentiation of the mammalian ovary. Chassot AA, Ranc F, Gregoire EP, Roepers-Gajadien HL, Taketo MM, Camerino G, de Rooij DG, Schedl A, Chaboissier MC. Hum Mol Genet. 2008 17 : 1264-77.

The PGD2 pathway, independently of FGF9, amplifies SOX9 activity in Sertoli cells during male sexual differentiation. Moniot B, Declosmenil F, Barrionuevo F, Scherer G, Arltake K, Malki S, Marzi L, Cohen-Solal A, Georg

I, Klattig J, Englert C, Kim Y, Capel B, Eguchi N, Urade Y, Boizet-Bonhoure B, Poulat F. *Development*. 2009 136: 1813-21.

#### *Contrôle endocriné de la reproduction*

GnRH and GnRH receptors in metazoa: a historical, comparative, and evolutive perspective. Kah O, Lethimonier C, Somoza G, Guilgur LG, Vaillant C, Lareyre JJ. *Gen Comp Endocrinol*. 2007 153: 346-64.

Neuroendocrine control by dopamine of teleost reproduction. Dufour S, Sebert ME, Weltzien FA, Rousseau K, Pasqualini C. *J Fish Biol*. 2010 76: 129-60.

Cyclical DNA methylation of a transcriptionally active promoter. Métivier R, Gallais R, Tiffoche C, Le Péron C, Jurkowska RZ, Carmouche RP, Ibberson D, Barath P, Demay F, Reid G, Benes V, Jeltsch A, Gannon F, Salbert G. *Nature*. 2008 452: 45-50.

Conditional inactivation of androgen receptor gene in the nervous system: effects on male behavioral and neuroendocrine responses.

Raskin K, de Gendt K, Duittoz A, Liere P, Verhoeven G, Tronche F, Mhaouty-Kodja S. *J Neurosci*. 2009 29: 4461-70.

Cependant, l'utilisation du modèle murin est ralentie en France par l'inadéquation des structures animalières de proximité: faiblesse des infrastructures, et des moyens financiers et humains qui y sont consacrés. Les chercheurs sont confrontés à des difficultés logistiques considérables pour mener leurs recherches sur la souris ou le rat, et font difficilement face aux coûts énormes d'utilisation de ces modèles essentiels. Il est impératif de développer des structures animalières de proximité assurant la réactivité des analyses et des conduites expérimentales, en parallèle au maintien des gros centres qui répondent aux besoins nationaux de génération et de maintien de lignées mutantes.

Le problème du modèle souris ne doit pas occulter le soutien que le CNRS doit impérativement fournir aux laboratoires ayant investi dans le développement de nouveaux modèles d'étude, souvent marins, en matière de biologie du développement ou d'Evo-Devo (exemples: ascidie, plus récemment *Amphioxus*, encore plus récemment: *Clytia*, lamproie, roussette). L'investissement de ces équipes pionnières en termes de prise de risque, temps consacré, multiplicité des verrous à lever, et coût financier, est très élevé, et il est essentiel que le CNRS, seul organisme français missionné dans ce sens, les accompagne dans ce domaine de recherche fondamentale, pionnière et risquée dont les retombées cognitives sont souvent autant inattendues que considérables.

## **5 – ENJEUX TECHNOLOGIQUES ET ORGANISATIONNELS**

### **5.1 ANIMALERIES, MODÈLES ANIMAUX ÉMERGENTS**

La France, et le CNRS en particulier, a fourni des efforts dans le domaine des structures d'envergure nationale pouvant conduire à la production et au maintien de modèles murins (ICS ou Clinique de la souris à Strasbourg, CDTA à Orléans, SEAT à Villejuif).

### **5.2 IMAGERIE, INTERFACE AVEC LA PHYSIQUE**

Avec le développement de l'imagerie et des modèles animaux permettant de faire de l'imagerie 4D *in vivo* sur l'embryon, entier ou non, comme le poisson-zèbre, le nématode, l'ascidie, etc., les biologistes du développement viennent de prendre un tournant majeur consistant à analyser à l'échelle cellulaire, voire subcellulaire, le développement de groupes de cellules, de tissus, d'organes ou même de

l'embryon entier aux stades précoces, tournant qu'il convient d'accompagner et d'amplifier. L'interface avec la physique mérite d'être développée, non seulement sur le plan du traitement des signaux et des images, mais aussi sur les plans de la mécanique ou de la matière molle qui sont essentiels pour comprendre les paramètres physiques conditionnant le fonctionnement des systèmes biologiques. La biologie du développement est le domaine par excellence où la cellule doit être considérée dans son environnement, constitué par d'autres cellules et la matrice extracellulaire, et il convient de développer de nouvelles approches (ingénierie tissulaire, culture en 3D, imagerie 3D) et de prendre en compte les contraintes physiques pour explorer cette troisième dimension qui fait encore défaut dans les études. À ce titre, le dialogue entre physiciens et biologistes se développe mais doit être encouragé, notamment par la mise en place de nouvelles filières de formation et la mise en place de véritables laboratoires d'ingénierie collaborant avec les laboratoires de recherche en biologie.

## 5.3 ANALYSE DES DONNÉES HAUT DÉBIT, MODÉLISATION

À l'heure du séquençage à haut débit qui permet l'accès au séquençage génomique et aux données de transcriptome ou ChIP/Seq chez un spectre très large d'organismes, la bio-informatique et les systèmes d'analyses à haut débit sont manifestement sous-développés. L'acquisition de données quantitatives de masse devrait conduire à l'éclosion des biomathématiques, mais la mise en place de cette nouvelle frontière de la biologie est encore trop timide.

De même, quelques laboratoires pionniers développent des modèles mathématiques pour modéliser des réseaux de régulation du cycle cellulaire, du développement embryonnaire ou du contrôle des formes (*Développement-Pasteur*, *IBDML-Marseille*, *IGBMC-Strasbourg*,

*N&D-Gif/Yvette*, *SAE-Paris*). Cette tendance est encore timide, reflétant la dispersion, en France, des interactions entre bio-informaticiens, modélisateurs et biologistes du développement. Il est impératif de faire évoluer la situation par la mise en place de différents dispositifs : filières d'enseignement permettant la confrontation de la biologie, de l'informatique et des mathématiques, regroupements de laboratoires aux interfaces, création d'hôtels à projets multidisciplinaires, plateformes régionales de grande envergure dans les domaines de la génomique associant séquençage à ultra haut débit, analyse informatique des données et modélisation, etc.

## 5.4 PROGRAMMES ATIP ET EUROPÉENS

Le programme ATIP développé par le département des Sciences du Vivant depuis près de 20 ans, et son action spécifique Biologie du Développement ont contribué sans nul doute au renouveau et à l'essor de nos disciplines. Il est certain que l'accueil d'équipes ATIP tend de plus en plus à renforcer à la fois la cohésion et la prise de risque des laboratoires ou instituts d'accueil et que le programme ATIP doit être maintenu sans que son orientation soit modifiée par la fusion avec le programme AVENIR de l'INSERM.

*Créations d'ATIP dans les domaines stratégiques de la section 26 depuis 2001*

T. Lecuit, IBDML, Marseille

H. Yasuo, Station marine de Villefranche/Mer

A. McDougall, Station marine de Villefranche/Mer

V. Castellani, CGMC, Lyon

Y. Bellaïche, Institut Curie, Paris

F. Helmbacher, IBDML, Marseille

F. Parcy, CEA, Grenoble

A.H. Monsoro-Burq (MC) Institut Curie, Orsay

A.M. Pret (MC) CGM, Gif/Yvette  
 S. Jarriault, IGBMC Strasbourg  
 A. Mocqrigh, IBDML, Marseille  
 L. Vandiel, CBD Toulouse  
 A. Davy, CBD, Toulouse  
 L. Pintard, IJM, Paris  
 N. Gompel, IBDML, Marseille  
 R. Le Borgne, IGD, Rennes  
 R. Basto, Institut Curie, Paris  
 G. Halet, IGD, Rennes  
 V. Galy, LBD, Paris  
 M. Delattre, LBMC, Lyon  
 C. Braendle, IBDC, Nice  
 F. Besse, IBDC, Nice  
 V. Orgogozo, IJM, Paris  
 C. Maurange, IBDML, Marseille

*Chercheurs de la section 26 reconnus par le Programme Young Investigator Program de l'EMBO*

Stéphane Noselli, ISBDC, Nice  
 Thomas Lecuit, IBDML, Marseille  
 Elena Levashina, IBMC, Strasbourg  
 Carsten Janke, CRBM, Montpellier

*Chercheurs de la section 26 reconnus par les programmes de l'ERC*

R. Basto, GBD-Curie, Paris  
 G. Cavalli, IGH, Montpellier  
 O. Pourquié, IGBMC, Strasbourg  
 J.M. Reichhart, IBMC, Strasbourg

## 5.5 STRUCTURATION DES LABORATOIRES

Le caractère intégratif des recherches dans les domaines de la reproduction et de la

biologie du développement et de l'évolution s'est traduit ces dernières années par une tendance au regroupement de petites unités en instituts ou structures fédératives facilitant l'implantation et l'accès à des équipements performants et à des élevages et/ou services de transgénèse. Bien que des regroupements soient parfois induits, en partie, par l'évolution des écoles doctorales et des politiques régionales ou universitaires, il faut noter la réussite de ces créations (exemples : *IBDML-Marseille-Luminy*, *GReD-Clermont-Ferrand*, *IGFL-Lyon*). Les appels d'offre récents pour de nouvelles équipes au sein de gros laboratoires de biologie du développement (*BD-Villefranche/Mer*, *GBD-Curie Paris*, *CGM-Gif/Yvette*, *IBDC-Nice*, *IBDML-Marseille*, *IGFL-Lyon*, *IJM-Paris*, *LBD-Paris...*) se situent dans cette même tendance.

## 5.6 RETOMBÉES SOCIALES ET ÉCONOMIQUES

Il faut souligner que les études Evo-Devo, par l'exploration de la richesse du vivant ont souvent des retombées inattendues et prometteuses pour des problèmes de santé publique ou des exploitations biotechnologiques. Un exemple est « l'exploitation » des connaissances accumulées et des stratégies expérimentales développées sur le modèle drosophile pour l'étude d'insectes d'intérêt médical (moustiques) ou agronomique (lépidoptères, abeille). Les questions touchant à l'évolution du parasitisme et des systèmes sensoriels sont deux des domaines pour lesquels les retombées en termes de santé publique sont extrêmement prometteuses. De même les recherches sur la gamétogenèse et la reproduction auront à plus ou moins long terme des répercussions sur le succès de méthodes de clonage chez les animaux. Enfin le domaine des cellules souches est étroitement imbriqué avec nos connaissances des embryons et la capacité à prélever et à contrôler le destin des cellules issues de l'embryon, sans oublier sa contribution au progrès des médecines cancéreuse et régénérative. De

manière générale, la complémentarité (et non la compétition) des recherches effectuées au CNRS et à l'INSERM est essentielle. Les difficultés rencontrées ces dernières années dans les relations entre les deux EPST et leurs répercussions négatives au niveau des unités concernées est certainement contre-productive, en

particulier vis à vis des relations avec les entreprises. Au sein de l'Alliance Aviesan, l'ITMO BCDE (Biologie cellulaire, Développement, Évolution) devra jouer un rôle fédérateur essentiel pour assurer la cohésion des recherches menées sur les plans fondamentaux et appliqués au sein des différents organismes.

## ANNEXE : DÉVELOPPEMENT DES ACRONYMES DE LABORATOIRES

BDR	Biologie du Développement et Reproduction (UMR 1198, Jouy-en-Josas)	CGMC	Centre de Génétique Cellulaire et Moléculaire (UMR 5534, Villeurbanne)
BFA	Biologie Fonctionnelle et Adaptative (EAC 4413, Paris)	CIML	Centre d'Immunologie Marseille-Luminy (UMR 6102, Marseille)
BioDev	Biologie du Développement (UMR 7009, Villefranche/Mer)	CIRID	Composantes Innées de la Réponse Immunitaire et Différenciation (UMR 5164, Bordeaux)
BIOM	Biologie Intégrative des Organismes Marins (FRE 3355, Banyuls/Mer)	CRBM	Centre de Recherche de Biochimie Macromoléculaire (UMR 5237, Montpellier)
BOREA	Biologie des Organismes et Écosystèmes Aquatiques (UMR 5178, Paris)	CSGA	Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation (UMR 6265, Dijon)
BVME	Biologie Végétale et Microbiologie Environnementale (UMR 6191, Marseille)	DNPG	Dynamique nucléaire et plastivité du génome (UMR 218, Institut Curie Paris)
CBD	Centre de Biologie du Développement (UMR 5547, Toulouse)	GBD	Génétique et Biologie du Développement (UMR 3215, Institut Curie Paris)
CDC	Compartimentation et dynamique cellulaires (UMR 144, Institut Curie Paris)	GDNP	Génétique du Développement Normal et Pathologique (U-636, Nice)
CEDC	Centre Épигénétique et Destin Cellulaire (UMR 7216, Paris)	GRéD	Génétique, Reproduction et Développement (UMR 6247, Clermont-Ferrand)
CGM	Centre de Génétique Moléculaire (FRE 3144, Gif/Yvette)	IAB	Institut Albert Bonniot (U-823, Grenoble)
		IAL	Institut André Lwoff (IFR 89, Villejuif)
		IBDC	Institut de Biologie du Développement et du Cancer (UMR 6543, Nice)

IBDML	Institut de Biologie du Développement de Marseille-Luminy (UMR 6216, Marseille)	LN-ESPCI	Laboratoire de Neurobiologie de l'ESPCI (UMR 7637, Paris)
IBENS	Institut de Biologie de l'École Normale Supérieure (UMR 8197, ENS Paris)	LNA	Laboratoire de Neuroimmunologie des Annelides (ESA 8017, Lille)
ICM	Interactions Cellulaires et Moléculaires (UMR 6026, Rennes)	MS	Mer et Santé (UMR 7150, Roscoff)
IGBMC	Institut de Génétique et de Biologie Moléculaire et Cellulaire (UMR 7104, Strasbourg)	N&D	Neurobiologie et Développement (UPR 3294, Gif/Yvette)
IGD	Institut Génétique et Développement (UMR 6061, Rennes)	Pasteur	Bases génétiques, moléculaires et cellulaires du développement (URA 2578, Pasteur Paris)
IGFL	Institut de Génomique Fonctionnelle (UMR 5242, ENS Lyon)	PMSNC	Physiopathologie des maladies du système nerveux central (UMR 7224, Paris)
IGH	Institut de Génétique Humaine (UPR 1142, Montpellier)	PRC	Physiologie de la Reproduction et des Comportements (UMR 6175, Nouzilly)
IJM	Institut Jacques Monod (UMR 7592, Paris)	RIDI	Réponse Immunitaire et Développement chez les Insectes (UPR 9002, Strasbourg)
ING	Institut des Neurosciences de Grenoble (U-836, Grenoble)	SAE	Systématique, Adaptation, Évolution (UMR 7138, Paris)
INM	Institut des Neurosciences de Montpellier (U-583, Montpellier) – Institut Cochin : UMR 8104, Paris	SBR	Station Biologique de Roscoff (CNRS-UPMC-INSU, Roscoff)
ISE	Institut des Sciences de l'Évolution (UMR 5554, Montpellier)	SNM	signalisation normale et pathologique : de l'embryon aux thérapies innovantes des cancers (UMR 3347, Institut Curie Orsay)
LBD	Laboratoire de Biologie du Développement (UMR 7622, Paris)	U3B	Unité de Biotechnologie, Biocatalyse et Biorégulation (UMR 6204, Nantes)
LBMC	Laboratoire de Biologie Moléculaire de la Cellule (UMR 5239, ENS Lyon)	VMB	Végétaux Marins et Biomolécules (UMR 7139, Roscoff)
LEGS	Laboratoire Évolution, Génomes et Spéciation (UPR 9034, Gif/Yvette)		



# COMPORTEMENT, COGNITION, CERVEAU

*Président de la section*  
Martin GIURFA

*Membres*

Liliana AUDIN  
Fabienne AUJARD  
Philippe CASTEL  
Henri COULAUD  
Georges DI SCALA  
Pascal HUGUET  
Christophe JOUFFRAIS  
Didier LERAY  
Marion LUYAT  
Stéphanie MACCARI  
Isabelle MAILLOCHON  
Pascal MAMASSIAN  
Bernard MAZOYER  
Hélène OTZENBERGER  
Laure RONDI-REIG  
Angéla SIRIGU  
Pierre THOMAS  
Simon THORPE  
Jean-Louis VERCHER

## 1 – INTRODUCTION GÉNÉRALE

La section 27 couvre un ensemble cohérent de disciplines, comprenant la psychologie, l'éthologie et les neurosciences intégratives et cliniques. Les interactions entre ces disciplines sont naturelles et constituent à l'heure actuelle l'essence même des recherches effectuées au sein de nombreux laboratoires relevant de cette section. L'intitulé de la section résume parfaitement ses objectifs de recherche, à savoir l'étude du comportement en tant qu'expression objectivable des processus cognitifs d'une part, et le décryptage des bases neurales de ces fonctions cognitives, en conditions normales et pathologiques d'autre part. Identifier les règles d'interaction du sujet humain ou animal avec le monde qui l'entoure, comprendre le développement cognitif humain et ses spécificités (ex : langage), mais aussi comprendre l'organisation du système nerveux, la nature des relations qui unissent activités neuronales et fonctions (perception, motricité, attention, émotion, mémoire, raisonnement, décision...), et pénétrer les mécanismes (développementaux, dégénératifs ou autres) qui conduisent à un fonctionnement pathologique, constituent des buts essentiels de la recherche menée au sein de la section. Les enjeux de cette recherche sont immenses, puisqu'il s'agit d'un côté de mieux comprendre le comportement et le fonctionnement du cerveau en relation avec

les processus mentaux, et d'un autre côté d'optimiser les méthodes d'apprentissage, d'améliorer le diagnostic des maladies mentales, d'ouvrir de nouvelles perspectives dans le domaine biomédical et de répondre au coût économique et social – dont le poids ne fait que croître avec l'allongement de l'espérance de vie – que représente aujourd'hui le bien-être tout au long de la vie, la prévalence des maladies mentales, y compris chez l'enfant et l'adolescent, l'incidence accrue du vieillissement et des démences comme la maladie d'Alzheimer ou encore les comportements addictifs.

Plutôt qu'une frontière imperméable aux autres disciplines, la définition d'un champ d'investigation commun de la section constitue l'ancrage nécessaire aux interactions avec les domaines connexes tels qu'informatique, robotique, intelligence artificielle, neurosciences moléculaires et cellulaires, linguistique, philosophie... Le positionnement de la section est matérialisé par son rattachement à l'Institut des Sciences Biologiques (INSB), ainsi que ses interactions privilégiées avec l'Institut des Sciences Humaines et Sociales (INSHS) et l'Institut des Sciences Informatiques et de leurs Interactions (INS2I). L'implication de la section 27 dans les approches transversales s'exprime également par son intervention dans trois Commissions Interdisciplinaires : 42 – Sciences de la communication, 44 – Cognition, langage, traitement de l'information, systèmes naturels et artificiels, 45 – Dynamique des systèmes environnementaux, développement durable, santé et société. Les objectifs de recherche de la section 27 rencontrent largement ceux de l'Institut Thématique Multi-Organisme (ITMO) *Neurosciences, Sciences Cognitives, Neurologie, Psychiatrie*, et il ne fait nul doute que la section constituera un interlocuteur motivé dans la mise en œuvre des propositions actuelles de l'ITMO.

La force et originalité de l'activité de recherche menée au sein de la section 27 reposent sur sa nature essentiellement pluridisciplinaire. Afin de proposer une vision et analyse détaillées de l'état et évolutions de la recherche au sein des unités émergeant à la section, nous avons cependant divisé ce rapport en quatre

grands axes disciplinaires : **1) psychologie expérimentale et cognitive, 2) éthologie, 3) neurosciences intégratives, et 4) neurosciences cliniques.** Cette division n'a pour but que de pouvoir approfondir l'analyse que ce rapport de conjoncture demande et ne constitue en aucun cas une vision cloisonnée de ces disciplines. Les frontières entre ces quatre domaines thématiques sont souvent diffuses et nombreuses unités de la section constituent de véritables passerelles permettant le dialogue et l'échange entre domaines.

## 2 – LA PSYCHOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET COGNITIVE

### 2.1 DÉVELOPPEMENT COGNITIF ET PSYCHOLINGUISTIQUE

#### Le développement de l'enfant

Les études sur le *développement de l'enfant*, en France, concernent aussi bien le développement sensori-moteur que le développement du langage. Concernant le premier aspect, des recherches portent sur la représentation du monde physique. Notre pays s'insère dans les recherches internationales sur les compétences précoces tout en présentant des spécificités, avec des travaux sur les intégrations entre modalités sensorielles (e.g., toucher/vision), et sur la coordination perception – motricité. D'autres travaux tentent de concilier l'existence de compétences précoces et d'erreurs persistantes chez les enfants, en particulier en invoquant une maturation tardive des capacités d'inhibition.

Les recherches prennent aussi une orientation plus appliquée. Les applications sont soit de nature pédagogique (étude des apprentissages scolaires et de leurs difficultés, notamment la dyslexie, la dyscalculie, etc.), soit du

domaine de la santé, étude de l'hyperactivité et de pathologies comme l'autisme, le syndrome de Williams, etc.). La neuropsychologie développementale est en pleine expansion.

On note une désaffection progressive pour les études comportementales (perception, cognition, motricité) sur la petite enfance, vraisemblablement pour des raisons d'équipement et de surfaces nécessaires à de telles études. Ceci est spécifique à la France, car nous avons les connaissances permettant de déterminer les signes précoces de certaines pathologies et pas uniquement à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Il existe des études épidémiologiques qui permettent de suivre des enfants présentant dès la naissance un risque du développement (*cf.* les études sur les prématurés). Il serait nécessaire de développer de telles études. Les recherches longitudinales demeurent néanmoins rares, parce que coûteuses.

## La psycholinguistique

**La psycholinguistique** développementale bénéficie clairement des avancées de la recherche sur le traitement de l'écrit chez l'adulte. La France est devenue l'un des pays majeurs pour les modèles de l'accès au lexique mental, en production comme en compréhension. Les travaux ont permis l'élaboration de modèles psycholinguistiques de la lecture des mots isolés qui simulent bien les performances des sujets sains ou cérébrolésés. Des études de neuroimagerie ont permis la mise en évidence d'aires spécifiques pour le traitement de la forme visuelle des mots. À l'heure actuelle, les modèles du sujet adulte sont envisagés du point de vue du développement du langage chez l'enfant, en considérant en particulier les causes, éventuellement génétiques, de certains troubles du développement. Des projets nationaux et européens sont en cours sur ces sujets. L'étude du **développement précoce du langage oral** demeure aussi un point fort des recherches en France. Des travaux ont ainsi mis en évidence la sensibilité des bébés aux propriétés rythmiques qui peuvent distinguer les langues. Les regroupements prosodiques

pourraient constituer une base essentielle de la distinction entre les « petits » mots grammaticaux et les autres mots. De même, les travaux sur les capacités d'apprentissage implicite suggèrent que l'isolement des mots dans la parole entendue pourrait s'appuyer sur des mécanismes simples d'extraction de régularités. Les travaux de psychologie du langage sont moins développés concernant la compréhension des phrases chez l'adulte, même si les phénomènes d'accord entre nom et verbe, ou le traitement de certaines constructions grammaticales sont envisagés par certains chercheurs. Il est souhaitable que ce domaine continue d'être fertilisé par des interactions entre linguistes et psychologues. De même, les travaux sur la compréhension du discours ou du texte semblent moins représentés en France que dans le monde anglo-saxon.

Concernant la psycholinguistique de l'adulte ou de l'enfant, de nombreux laboratoires CNRS localisés à Marseille, Paris et Lyon apportent des contributions de très haut niveau international. Une liste complète des unités travaillant sur les troubles d'apprentissage du langage écrit chez l'enfant devrait aussi mentionner de nombreuses équipes insérées dans des laboratoires de psychologie cognitive localisés à Grenoble, Dijon et Clermont-Ferrand.

## 2.2 MÉMOIRE, APPRENTISSAGES, RAISONNEMENT

L'étude de **la mémoire et de l'apprentissage** reste un des thèmes majeurs de la psychologie scientifique. Les chercheurs français ont contribué à l'émergence des travaux actuels sur l'apprentissage et la mémoire implicites en étant au cœur des débats les plus vifs sur ces questions. Ce type d'apprentissage est particulièrement important en ce qu'il opère à l'insu du sujet et ne semble dépendre pour son efficacité ni de l'âge, ni du niveau intellectuel des individus. La recherche française a permis une avancée importante de ce domaine en proposant des modèles théoriques originaux

qui permettent de repenser les rapports entre conscience, mémoire et apprentissage. Les travaux ne portent plus seulement sur l'apprentissage de la lecture, mais envisagent aussi le calcul ou la musique. De même, des chercheurs français ont fait une percée dans l'étude de la mémoire de travail, système cognitif chargé du maintien et du traitement simultané de l'information. Ce concept a rencontré un succès considérable et se substitue peu à peu à la notion plus vague d'intelligence. La recherche française s'est illustrée en y introduisant une dimension temporelle jusqu'ici négligée. L'un des domaines d'application des recherches sur la mémoire de travail concerne par exemple le développement du raisonnement chez l'enfant et les effets du contexte social sur les productions cognitives. En effet, dans la mesure où ce système de mémoire permet de maintenir des représentations transitoires envisagées pendant le raisonnement, l'accroissement de sa capacité peut induire une amélioration de la résolution de problèmes. Une autre approche du raisonnement s'inspire directement de la « théorie de la pertinence ». Cette théorie linguistique a d'abord éclairé le rôle du contexte dans la communication. En France, des chercheurs ont montré que cette théorie permettait de prédire des erreurs de raisonnement survenant dans des contextes spécifiques. Il s'agit d'ailleurs d'un cas remarquable d'interaction entre Sciences Humaines et Sociales et Sciences du Vivant. On note un développement du champ de la pragmatique en psychologie et en neuropsychologie.

Plus généralement, les psychologues français demeurent très actifs dans le domaine des apprentissages scolaires et de la psychologie de l'éducation, non seulement en ce qui concerne la lecture comme nous l'avons dit, mais aussi dans celui du calcul et de l'orthographe où leurs travaux sont fréquemment cités. On notera cependant que, contrairement à d'autres pays, les données de la psychologie sont insuffisamment prises en compte dans l'établissement des progressions pédagogiques, où le débat idéologique est d'autant plus vif que les données de la recherche y sont le plus souvent ignorées.

## 2.3 RÉGULATION SOCIALE DU FONCTIONNEMENT COGNITIF, ERGONOMIE COGNITIVE

Les comportements et leurs processus cognitifs et neurophysiologiques sous-jacents sont ancrés dans des fonctionnements sociaux qui ont une grande importance chez l'animal, mais aussi chez l'homme. C'est précisément la caractéristique fondamentale de la **psychologie sociale expérimentale** que d'intégrer la dimension sociale et culturelle de l'homme. À l'aide des concepts et des méthodes de la psychologie cognitive, cette autre branche de la psychologie étudie 1) la manière dont le sujet humain organise mentalement son environnement social, c'est-à-dire comment il encode, stocke et récupère l'information sur cet environnement (première génération des travaux sur la « cognition sociale »), 2) les conséquences de cette organisation avec ses composantes affectives et émotionnelles sur l'interaction sociale (deuxième génération), 3) et de manière complémentaire (troisième génération), l'influence de cette interaction sur les fonctionnements cognitifs eux-mêmes (mémoire, attention, langage, etc.). L'importance des travaux conduits dans ce cadre tient à ce qu'ils permettent de compléter et dans certains cas de réviser nos connaissances sur le système cognitif. Par exemple certains processus cognitifs longtemps jugés fortement automatiques (traitement lexical/sémantique de mots isolés) s'expriment en réalité de manière différenciée selon que l'individu est ou non placé en présence de ses semblables. Plus généralement, les performances cognitives de l'enfant comme celles de l'adulte jeune ou âgé s'avèrent liées non seulement aux compétences du sujet mais aussi à la signification évaluative et émotionnelle qu'il attribue à l'activité cible (la tâche) et/ou à son contexte de traitement. La psychologie sociale joue ainsi depuis une vingtaine d'années un rôle majeur dans l'élucidation des relations complexes entre les processus liés à l'attention et ceux d'ordre émotionnel ; entre l'émotion et les processus en rapport avec le jugement et la

décision, pour n'en citer que quelques-unes. Les travaux dans ce domaine alimentent de manière indispensable certaines disciplines en émergence, en particulier la neuroéconomie et les neurosciences sociales ou affectives, dont une part essentielle prend appui sur les travaux des psychologues sociaux. Le développement récent des neurosciences sociales vise précisément à identifier les bases cérébrales de la cognition sociale et les corrélats neurobiologiques/neurophysiologiques des régulations liées au contexte social chez l'homme. Enfin, les travaux de la psychologie sociale mettent aussi en évidence les mécanismes complexes de catégorisation et de comparaison qui régulent la perception de soi et d'autrui, l'identité sociale et les relations entre groupes, en particulier les biais de favoritisme intragroupe et les discriminations des hors-groupes. La compréhension de ces mécanismes demeure fondamentale pour aborder et résoudre de multiples problèmes sociétaux. C'est d'ailleurs une des caractéristiques de la psychologie sociale que de livrer des pistes pour l'action dans des champs aussi divers que l'éducation, la santé, le travail et les décisions économiques, ou encore l'expertise judiciaire.

Partie intégrante des sciences cognitives, et forte d'importantes implications sociétales, la recherche dans ce secteur mérite d'être encouragée. Elle l'est partout ailleurs en Europe et aux États-Unis depuis 25 ans, et plus encore aujourd'hui en raison de son importance dans de nombreux programmes interdisciplinaires impliquant par exemple les neurosciences intégratives, la sociologie, la justice, ou l'économie. Cinq unités CNRS localisées à Marseille, Clermont-Ferrand, Toulouse et Poitiers comportent des équipes ou au minimum des programmes de cognition sociale. En outre, un nombre croissant d'unités de neurosciences intègrent des équipes ou des programmes sur la cognition sociale principalement dans son volet pathologique, en référence notamment à l'autisme et à la schizophrénie. Cette meilleure prise en compte des questions liées, chez l'homme, à la cognition socialement régulée et aux compétences sociales de l'espèce au cours des 10 dernières années a permis à la France de rattraper un peu

son retard dans un domaine très développé par ailleurs en Europe et Outre-Atlantique. Les équipes ou laboratoires français dans ce domaine portent aujourd'hui plusieurs paradigmes scientifiques originaux qui lui permettent de rivaliser durablement avec les meilleurs laboratoires du monde à la condition de soutenir les efforts de financement et la dynamique engagée dans ce secteur. Cette orientation scientifique rejoint l'axe stratégique « Cognition-Socialité-Cerveau » du CNRS (cf. texte programmatique « Horizon 2020 ») et répond à l'un des thèmes (« régulation sociale ») encouragé par cet organisme depuis 1996 dans ses rapports successifs de conjoncture.

L'étude du fonctionnement cognitif dans des situations spécifiques (travail, conduite automobile, recherche sur le Web, etc.) est aussi développée dans notre pays. Aujourd'hui, les individus sont conduits quotidiennement à dialoguer par l'intermédiaire d'ordinateurs, de nombreux services utilisent des serveurs pour interagir avec des usagers. Les travaux de psychologie conduits dans des laboratoires français permettent de tenir compte des résultats fondamentaux pour améliorer les interactions homme-machine. **L'ergonomie cognitive** reste l'un des domaines essentiels où les recherches de psychologie cognitive trouvent des applications, et se fait dans de nombreux laboratoires localisés à Paris, Grenoble, Nantes, Poitiers et Toulouse. Le GDR 3169 « PsychoErgo » permet d'augmenter encore la synergie entre les acteurs Français dans cet autre domaine très important de la section 27. L'ergonomie cognitive mérite d'être renforcée non seulement pour contribuer à faire face aux nouveaux défis technologiques, mais aussi parce que, du fait même de sa confrontation permanente à des situations complexes, ce secteur livre des résultats intéressants et en réalité indispensables à la recherche fondamentale sur la cognition.

Les interfaces homme-machine sont aussi étudiées dans le cadre des recherches en **psychopathologie**. Ainsi, des outils ont été mis au point pour diagnostiquer et soigner différentes pathologies en utilisant la réalité virtuelle pour aider certains phobiques à surmonter leurs troubles. Mais des travaux

français en psychopathologie ont aussi apporté un éclairage nouveau sur la schizophrénie, par exemple en mettant en évidence les mécanismes impliqués dans les troubles de l'attribution d'intention. Les thèmes abordés jusqu'ici concernent surtout des fonctions cognitives de haut niveau, mais il convient de noter que notre pays est aussi reconnu sur le plan international pour ses travaux sur la perception.

## 2.4 PSYCHOPHYSIQUE ET PERCEPTION

Les études psychologiques sur la perception réalisées en France concernent l'ensemble des modalités sensorielles, avec un accent sur la vision, l'audition, le toucher et le système vestibulaire ainsi que l'interaction entre ces modalités. D'un point de vue strictement psychologique, ces études sont intimement liées au thème de l'attention, comme l'illustrent les travaux sur la « cécité au changement » qui montrent que certains changements de la scène visuelle restent inaperçus ; le thème de la détection des changements est également abordé en audition. En outre, au niveau théorique, la modélisation Bayésienne gagne du terrain en particulier dans le domaine de la vision, mais aussi pour théoriser certains phénomènes d'intégration entre plusieurs modalités sensorielles. Une tendance commune aux recherches sur la vision et l'audition concerne la volonté de réaliser des recherches sur la perception des « scènes naturelles » que celles-ci soient composées de stimuli visuels complexes, ou de plusieurs sources sonores (« cocktail-party »). Un autre aspect fortement développé dans notre pays concerne les applications en matière de prothèses (ex : implants cochléaires pour l'audition) ou de dispositifs de suppléance sensorielle. Enfin, il convient de souligner que les travaux de psychologie de l'audition conduits dans notre pays concernent aussi bien les sons de l'environnement que la parole ou la musique. Les travaux sur la perception ne se contentent pas d'examiner une sensibilité passive. Par exemple, la sensi-

bilité tactile manuelle est étudiée conjointement avec la sensibilité kinesthésique lors des mouvements des doigts, pour aboutir à une compréhension plus complète des mécanismes impliqués dans l'appréhension des objets. Mais notre pays demeure en retrait tant en nombre d'unités qu'en nombre de chercheurs ou d'enseignants chercheurs. Par exemple, concernant la vision ou l'audition, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et les Pays-Bas ont des effectifs de chercheurs dix fois supérieurs à la France. Les chercheurs français de ces domaines se sont regroupés récemment pour constituer des groupements de recherche (GDR) interdisciplinaires associant psychologues, modélisateurs et neuroscientifiques, en particulier les GDR-Vision et GRAEC pour la perception visuelle et auditive, respectivement.

## 2.5 VIEILLISSEMENT COGNITIF

Pour finir cette synthèse consacrée aux recherches en psychologie, il est intéressant de revenir sur le thème initial du développement. L'individu connaît des transformations majeures de son fonctionnement psychologique pendant l'enfance et l'adolescence, mais une autre période de la vie est marquée par des modifications fondamentales. La baisse du taux moyen de fécondité et l'amélioration continue des conditions de vie aux cours des dernières décennies, qui favorisent l'allongement de la durée de vie font du **vieillessement** une préoccupation majeure de ce début de siècle. La singularité de ce phénomène réside dans son caractère soudain, qui fait que de nombreux pays ne semblent pas s'y être préparé, ni l'avoir anticipé par des politiques appropriées. Les conséquences de la canicule de l'été 2003 en France en sont une illustration frappante. Le vieillissement touche l'ensemble des fonctions de l'homme, qu'elles soient physiques, mentales ou sociales. Les travaux de biologie du vieillissement montrent qu'il touche tous les systèmes de l'organisme d'une manière dynamique, indépendamment de l'espèce considérée. De la cellule jusqu'aux

niveaux les plus intégrés, tous les niveaux du vivant sont ainsi affectés. Des études réalisées en France ont permis de mettre en évidence un effet spécifique du vieillissement sur certaines fonctions de mémoire et d'apprentissage.

Il faut cependant souligner le caractère différentiel de l'impact du vieillissement. Le milieu social et les conditions de vie sont déterminants, marquant le caractère multifactoriel du vieillissement. Outre le processus du vieillissement, lié à la biologie de l'humain dans son individualité, et il faut également considérer les influences liées à l'environnement social et aux conditions de vie (travail, accès aux soins médicaux, au droit(s), etc.). Il convient aussi de distinguer ce qui ressort du vieillissement cognitif « normal » de ce qui ressort de processus démentiels pathologiques.

L'importance biologique et sociétale du vieillissement implique des recherches interdisciplinaires et une politique volontariste aux actions pérennes et significatives. Parmi les principales villes regroupant des équipes de recherche impliquées dans cette thématique on peut citer Poitiers, Marseille et Montpellier.

## **2.6 CONCLUSIONS SUR LA PSYCHOLOGIE**

En conclusion, notre pays a su développer des programmes originaux en psychologie, en particulier concernant la psycholinguistique du lexique, les compétences numériques, la cognition motrice, la mémoire implicite, la perception visuelle ou auditive, la conscience, la régulation sociale des fonctionnements cognitifs. Des domaines connaissent aujourd'hui un essor important : les neurosciences cognitives et sociales (interface psychologies cognitive et sociale et neurosciences intégratives), l'ergonomie cognitive, la psychologie du vieillissement. La neuroimagerie des fonctions cognitives s'est affirmée avec succès en France au cours des 10 dernières années. Ce développement cependant ne doit pas conduire à négliger les recherches comportementales sans

lesquelles les études de neuroimagerie s'essoufferaient rapidement (puisqu'elles perdraient alors leur objet). La recherche expérimentale avec ou sans neuroimagerie demeure une priorité pour l'étude des processus cognitifs, motivationnels et émotionnels et leur expression différenciée selon l'âge, l'état de santé ou le contexte social de l'individu. Les psychologues expérimentalistes et les neuroscientifiques ont montré, en France comme ailleurs, leur capacité à collaborer efficacement sur des thèmes largement interdisciplinaires. Il faut encourager cette collaboration notamment à travers le financement de plateformes techniques mutualisées. Enfin, la psychologie scientifique est forte de multiples applications et potentialités d'applications dans les secteurs de l'éducation, de la santé, du travail, de la justice, de l'économie, et de la protection de l'environnement dont il faudrait davantage encourager la montée en puissance et la valorisation.

## **3 – L'ÉTHOLOGIE**

L'objet d'étude de l'éthologie est le comportement, ce qui place cette discipline à un niveau central dans les sciences de la vie : celui de l'organisme en interaction avec son milieu. Elle présente également la particularité d'être intégrative et par essence interdisciplinaire. En s'appuyant sur quatre questions fondamentales : l'ontogenèse, la causalité, la fonction et l'évolution des comportements, elle crée naturellement des ponts avec la génétique, la neurobiologie, la psychologie, l'écologie, la physiologie et autres disciplines proches du Vivant et de l'Homme et de la Société.

### **3.1 CONTRIBUTIONS DE L'ÉTHOLOGIE**

À la différence d'une Biologie de Systèmes, l'Éthologie met l'accent sur l'étude du

comportement dans un milieu pertinent pour l'animal. Bien que celui-ci puisse être ramené à des conditions contrôlées et simplifiées de laboratoire, le cadre écologique-évolutif propre aux espèces étudiées n'est jamais perdu de vue. Ainsi, quand l'éthologie aborde des questions comme la cognition, son originalité réside dans la volonté explicite d'analyser dans quelle mesure les contraintes imposées par le milieu naturel peuvent être à l'origine de stratégies cognitives particulières d'une espèce particulière. La place de l'éthologie dans les sciences cognitives est essentielle et plusieurs équipes ont laissé une large part à la neuroéthologie et donc à la compréhension des bases neuronales des comportements, notamment de ceux faisant preuve de différents niveaux de plasticité. L'apport est essentiel et novateur en ce que ces approches se basent sur la connaissance des adaptations comportementales des espèces à leur milieu.

En ce sens, l'éthologie n'a pas vocation à limiter ses études à un nombre extrêmement réduit d'espèces modèles. Au contraire, la diversité des modèles animaux présents dans les études éthologiques permet de découvrir des compétences comportementales et/ou cognitives qui resteraient insoupçonnées si l'on ne se référait qu'aux « modèles expérimentaux classiques ». En cela, l'éthologie enrichit considérablement les débats sur l'évolution des sciences cognitives, permettant de dépasser les habituelles comparaisons hommes/singes/rongeurs. La richesse des modèles utilisés montre bien la diversité des adaptations cognitives et les convergences à des niveaux phylogénétiques différents. Elle rappelle, s'il y avait besoin, que l'évolution n'est pas linéaire, allant du simple au complexe. Les espèces étudiées par les équipes françaises vont de l'invertébré à l'homme, avec une représentation importante des insectes, oiseaux et certains mammifères. L'éthologie humaine est très peu représentée et mériterait de se développer, créant une interférence supplémentaire intéressante avec la psychologie. À partir de ces études, une véritable approche comparative des processus cognitifs et des architectures neurales qui les sous-tendent est donc possible. Ainsi, l'un des défis scientifiques fonda-

mentaux d'actualité, comprendre l'émergence de la pensée, prend ses racines dans les études du comportement animal orientées vers la cognition. Dans ce contexte, les apports de l'éthologie sont essentiels et complémentaires de ceux des « disciplines sœurs », la psychologie et les neurosciences. L'éthologie est donc une approche scientifique fondamentale dans la section 27 du CNRS dont l'intitulé « Cerveau, Cognition, Comportement » reflète aussi bien le sujets d'étude que la démarche scientifique de l'éthologie.

Ainsi, l'étude du comportement animal d'espèces « non-traditionnelles » peut apporter un nouveau regard à l'étude de problématiques d'actualité comme le vieillissement et les pathologies qui lui sont associées. Dans une époque où la population humaine connaît une augmentation constante de son espérance de vie, la gestion des personnes âgées et des pathologies qui apparaissent au cours du vieillissement est un réel problème de santé publique. Dans ce contexte, toute fonction biologique à forte valeur adaptative représente un enjeu majeur pour le maintien de l'intégrité physique et/ou psychologique de la personne âgée. Le vieillissement cérébral chez l'Homme, même en absence de démence, est caractérisé par une diminution des performances cognitives, et ce phénomène est amplifié dans les cas de vieillissement pathologique. L'éthologie permet d'identifier des espèces qui développeront naturellement ces processus et facilite ainsi l'étude des aspects écologiques et évolutifs du vieillissement. Les avancées scientifiques actuelles permettent de mieux caractériser les voies impliquées dans la détérioration des comportements avec l'âge et ouvrent des perspectives de diagnostic précoce qui permettront de réduire l'importance des traitements palliatifs. D'une manière générale, toute pathologie comportant des atteintes cérébrales se doit de prendre en compte les connaissances acquises dans le domaine de la neuro-éthologie, et donc les grands principes émergeant grâce à la mise en place d'une recherche translationnelle et inter-espèces.

L'étude des mécanismes sous-jacents au comportement se fait en gardant à l'esprit la

fonction (alimentaire, sociale, reproductive...) du comportement étudié, elle-même objet d'étude. La dimension comparative permet d'aborder la question de l'évolution des comportements, s'appuyant sur homologies et analogies. L'ontogenèse, l'approche du développement et les phénomènes de plasticité qui y sont liés, est une préoccupation commune à toutes les équipes d'éthologie. Cette approche pose des questions fondamentales telles que l'importance de l'environnement pré/post-natal, des congénères adultes/non adultes, de l'expérience et des phénomènes de plasticité sous-jacents. Apprentissage et mémoire permettent à l'animal de répondre de façon adaptée à un environnement changeant. La plasticité est un élément essentiel de l'adaptation des organismes à leur milieu, et caractériser la plasticité des comportements représente un élément clé dans la compréhension des facteurs optimisant la survie. Les limites de cette plasticité déterminent les capacités d'adaptation de l'organisme et donnent des indications *a contrario* des mécanismes sous-jacents à la régulation des comportements. Dans ce cadre, un accent a été mis ces dernières années à l'étude de la plasticité comportementale en relation avec la « personnalité » de l'individu dans un contexte évolutif comme la compréhension de l'émergence de la socialité, ou bien dans le contexte du fonctionnement des populations (communication et organisation sociales par ex.). L'éthologie apporte ici de nouveaux éclairages sur l'importance de l'expérience sociale et non sociale sur le développement des capacités cognitives. Par ailleurs, quand une approche neurobiologique y est associée, comme dans le cas de la neuroéthologie, il est possible d'identifier des réseaux nerveux et des structures cérébrales responsables de cette plasticité. En ce sens, l'avantage de travailler avec des modèles animaux dont l'organisation du système nerveux est moins complexe que celui de l'Homme apparaît comme évident.

### 3.2 ÉVOLUTION DE L'ÉTHOLOGIE

Dans un contexte d'ère « post génomique », il faut rester vigilant à encourager le maintien de l'étude des comportements *per se*. Alors que la caractérisation des génomes d'espèces modèles est devenue une réalité, l'étude fonctionnelle du rôle des informations génétiques caractérisées reste extrêmement faible. Seule une approche intégrative, basée sur le comportement animal, peut aider d'un côté à combler ce vide, et d'un autre côté à faire comprendre que le comportement observé ne résulte pas directement des gènes mais de l'interaction de ceux-ci avec des environnements donnés. Les éthologistes ne doivent pas, dans ce contexte, devenir des prestataires de service pour la caractérisation de gènes donnés. Au contraire, ils doivent conserver leur vision intégrative car le véritable travail commence une fois qu'un gène a été caractérisé. La connaissance très précise des comportements dans tous leurs aspects reste une base indispensable si l'on veut « poser les bonnes questions » au cerveau et à la génétique.

La France est reconnue comme un des pays phare en matière d'étude du comportement animal. Les publications et les avancées scientifiques dans ce domaine montrent la forte implication de nombreux laboratoires français dans cette recherche. Parce que l'éthologie couvre des domaines de recherche variés, alliant la neurobiologie et l'écologie en passant par la psychologie et la physiologie, cette discipline s'est grandement développée ces dernières années aussi bien dans des laboratoires spécifiquement dédiés à l'étude du comportement animal qu'au sein d'unités de recherche au champ plus large. En effet, grâce au développement récent des techniques d'exploration fonctionnelle du système nerveux et de génomes, cette discipline a pu faire des avancées considérables dans la compréhension des mécanismes de genèse et de régulation de l'expression des comportements, et a aussi trouvé un écho d'une nouvelle ampleur dans des champs disciplinaires tels que la dynamique des populations, la biodiversité et la pathologie cérébrale.

### 3.3 STRUCTURATION NATIONALE

Les dernières années ont vu l'éthologie française se restructurer et s'affirmer. Au-delà d'équipes bien insérées dans différentes unités, des laboratoires entièrement orientés vers différents aspects du comportement animal, principalement localisés dans des villes telles que Paris, Rennes, Strasbourg, Toulouse, ont acquis une présence et un rayonnement reconnus au niveau national et international. L'année 2009 a vu, par exemple, la réalisation en France de la XXXI<sup>e</sup> Conférence Internationale d'Éthologie impliquant 800 participants du monde entier. Au sein du CNRS, l'existence d'un GDR «Éthologie» (GDR CNRS 2822) a été un élément stratégique fondamental pour le soutien et le développement de la discipline. En effet, le GDR a été à l'origine de nombreuses actions structurantes allant de la réalisation de colloques nationaux au financement de projets de coopération entre équipes membres du GDR. Le renouvellement du GDR en 2008 et le recrutement de jeunes chercheurs au sein du CNRS dans ces dernières années ont été des éléments positifs permettant d'affirmer la discipline.

Au contraire, une fragilisation éventuelle des unités d'éthologie dans le cadre des évaluations AERES est à craindre dans la mesure où ces évaluations seraient guidées par des critères bibliométriques absolus ne tenant pas compte des spécificités de chaque domaine, la reconnaissance des journaux d'excellence domaine-spécifiques, au-delà de critères de facteur d'impact, et du nombre de chercheurs intégrant les différentes collectivités scientifiques. Dans la mesure où la politique en sciences de la vie serait dictée par de critères essentiellement médicaux ou utilitaires, tous les efforts fournis par les unités et les équipes existantes du domaine ayant fait preuve d'excellence et de reconnaissance internationale, pourraient être mis en sérieux danger. Nous alertons contre cette éventualité qui pourrait avoir des conséquences catastrophiques pour la recherche française. Dilapider un capital d'excellence est une forme de suicide scientifique qu'aucune tutelle ne devrait entériner.

### 3.4 CONCLUSION SUR L'ÉTHOLOGIE

Au-delà du cadre de l'évaluation AERES, et malgré l'excellence de la recherche éthologique française, traduite par un remarquable essor des publications, la discipline reste fragile par manque de moyens. Il est évident que le GDR, avec ses moyens extrêmement limités, ne peut pas assurer, à lui tout seul, les besoins des équipes de recherche du domaine. Ceci devient préoccupant dans un contexte où la tendance affirmée de plusieurs de ces équipes est d'intégrer des méthodes de génétique, biologie moléculaire et imagerie de l'animal aux approches comportementales. L'enrichissement de l'étude du comportement animal et de ses mécanismes, qui doit approfondir ces nouvelles voies, ne peut se faire qu'avec une disponibilité de moyens permettant d'atteindre ces buts. Il est alors important que les moyens soient donnés à l'éthologie. Enfin, une vigilance est nécessaire aussi pour que puisse être maintenue l'éthologie des primates, garante d'une meilleure connaissance des bases comportementales sur lesquelles appuyer d'éventuelles comparaisons et hypothèses évolutives. Il est donc essentiel qu'il y ait une reconnaissance des apports de cette discipline dans des domaines où elle est même rarement citée, comme celui des sciences cognitives, et par conséquent que ses moyens croissent rapidement, notamment à partir d'une évaluation équitable des projets ANR émanant du domaine.

En conclusion, il est essentiel que l'importance des apports de l'éthologie soit reconnue et sa visibilité accrue, permettant un accroissement urgent de ses effectifs et moyens. Son rôle d'interface entre neurosciences et psychologie/sciences humaines et l'apport de modèles animaux diversifiés sont un enrichissement évident dans tous les domaines liés au comportement.

## 4 – LES NEUROSCIENCES INTÉGRATIVES

Comprendre le fonctionnement du cerveau, décrypter les bases neurales de la plasticité cérébrale, des adaptations comportementales et des fonctions cognitives comme la perception, l'apprentissage et la mémoire, l'attention, les émotions ou la prise de décision ; mais aussi identifier les mécanismes responsables des pathologies connexes et soigner les maladies du cerveau constituent des enjeux majeurs reconnus des neurosciences intégratives regroupées au sein de la section 27. Face à la complexité du cerveau et à ses multiples niveaux d'organisation, depuis les édifices macromoléculaires formant les constituants élémentaires des cellules nerveuses, aux réseaux de signalisation intra et intercellulaires, aux connexions cellulaires et circuits locaux, et à la connectivité à grande échelle dans l'organisation anatomique globale du cerveau, les chercheurs de la section 27 dans le domaine des neurosciences intégratives ont su établir au cours des dernières années des interfaces fortes avec d'autres domaines de la biologie, notamment avec ceux détaillés précédemment, mais aussi de la physique, de la chimie, de l'informatique et des sciences humaines et sociales qui permettent les avancées les plus rapides. Ces recherches se concentrent surtout dans les pôles de neurosciences intégratives localisés à Paris, Bordeaux, Lyon, Marseille, Strasbourg et Toulouse.

C'est dans le cadre de ces recherches fondamentales que sont profilées aujourd'hui nombre de recherches à visée thérapeutique concernant les troubles des processus cognitifs liés au vieillissement, aux pathologies neuro-dégénératives, ou plus largement aux maladies neurologiques ou psychiatriques. En effet, les avancées de la recherche fondamentale dans ce domaine trouvent naturellement des applications pour de nombreuses pathologies généralement associées à des déficits d'apprentissage et de mémoire comme les maladies d'Alzheimer, de Parkinson ou de Huntington, les accidents vasculaires cérébraux, l'épilepsie,

les troubles du développement, les retard mentaux, l'autisme, la schizophrénie, les troubles anxio-dépressifs, ou encore l'addiction aux drogues ou les dérèglements des comportements individuels et sociaux. Elles trouvent également des applications importantes dans le développement de nouvelles thérapies (cellulaires, géniques, pharmacologiques, comportementales), comme dans celui des méthodes d'éducation et de communication entre individus ou pour combattre le « retrait du monde » qui caractérise souvent la perte des facultés d'apprentissage et de mémoire et dont l'impact est dévastateur pour le sujet comme pour son entourage.

Ces dernières années, de nouvelles synergies ont vu le jour entre neurosciences moléculaires, cellulaires, cognitives et computationnelles, accompagnées d'un renouveau important sur les plans conceptuel et méthodologique. Elles ont en particulier permis le plein essor des démarches fondées sur l'intégration des niveaux d'analyse du neurone à la fonction. À l'évidence, les succès anticipés depuis quelques années dans ce domaine émergent nettement aujourd'hui grâce notamment aux formidables développements des connaissances dans le domaine de la post-génomique fonctionnelle et de la biologie cellulaire et moléculaire du neurone d'une part, de la neurophysiologie des ensembles neuro-naux et de la neuroimagerie cognitive de l'autre. Dans cette démarche, le va-et-vient entre normal et pathologique constitue un élément clé permettant à la fois d'éclairer la compréhension du fonctionnement du cerveau en relation avec les processus mentaux et d'identifier avec de plus en plus de précision des mécanismes responsables d'altérations de la mémoire.

Le système nerveux est composé d'un grand nombre d'entités hétérogènes dont les interactions locales ont lieu à différents échelles dans l'espace (moléculaire, cellulaire, réseaux intercellulaires, organe, organisme, environnement...) et à différentes échelles de temps (de la milliseconde à l'année) pour créer des structures, des organisations et des comportements collectifs non réductibles au

comportement individuel des éléments qui les composent. Décrypter le mode d'organisation du système nerveux et sa dynamique plaide sérieusement pour l'étude de systèmes simples constitués d'un faible nombre de neurones identifiés. Dans ce cadre, plusieurs équipes de la section 27 réalisent leur recherche sur des modèles d'invertébrés (abeille, drosophile, écrevisse, aplysie...), de Vertébrés inférieurs (xénope, lamproie...) ou de rongeurs dans lesquels des microcircuits ganglionnaires ou spinaux sont interrogés. Les comportements moteurs (locomotion, posture, prise de nourriture, oculomotricité...) mais aussi les phénomènes d'apprentissage et mémorisation largement inscrits dans le répertoire naturel de l'animal constituent les modèles les plus largement étudiés en raison de la possibilité quasi immédiate de relier activité neuronale et comportement, rapprochant en cela ces modèles de ceux de la neuroéthologie décrits ci-dessus. Mieux que d'autres, ces approches permettent un va et vient continu entre neurobiologie cellulaire et neurobiologie intégrative, autorisant le développement et la validation de techniques combinant stimulation ciblée (ex : optogénétique) et visualisation directe de l'activité cellulaire.

En couplant ainsi analyse cellulaire (*in vitro* et/ou *in vivo*) et analyse comportementale intégrée, il est possible d'appréhender directement l'architecture fonctionnelle responsable du traitement de l'information entrante ainsi que de la genèse d'un comportement donné, parfaitement caractérisé et quantifié. Ce type d'analyse est employé afin de caractériser les architectures neurales élémentaires sous-tendant la capacité d'apprendre et mémoriser, et de localiser au niveau cellulaire divers types de trace mnésique. Ces travaux, menés par plusieurs équipes de la section 27, ont permis de comprendre que les mécanismes moléculaires à la base de la formation des mémoires à long-terme sont similaires chez l'invertébré et le vertébré, ouvrant ainsi une nouvelle dimension d'études sur la pharmacologie de l'apprentissage et la mémoire à visée thérapeutique. De ce type d'analyse est né aussi le concept de *générateur central de pattern* qui aujourd'hui semble pouvoir

s'appliquer y compris aux fonctions plus cognitives du cerveau. Il est d'ailleurs de plus en plus évident que les micro-réseaux spinaux (ou ganglionnaires chez les invertébrés) partagent les mêmes capacités que les circuits cérébraux, que ce soit en terme de propriétés intégratives, de mécanismes adaptatifs ou d'apprentissage. Dès lors, il peut être envisagé d'utiliser ces connaissances dans le cadre de réhabilitation fonctionnelle spinale après lésion, en cherchant par exemple à amplifier les propriétés plastiques intrinsèques de la moelle lésionnelle sans se limiter à favoriser la reconnexion des centres supra-spinaux. Ainsi, l'étude des propriétés de codage, d'intégration et d'apprentissage des microcircuits représente aujourd'hui en enjeu sociétal très important et se doit d'être encouragée.

Les techniques d'analyse intracellulaire ont permis de pouvoir interroger directement le neurone et de définir ses propriétés et mécanismes intrinsèques, alors que les enregistrements multi sites, multi unitaires et extracellulaires, ainsi que les techniques d'imagerie cellulaire (calcique, voltage-sensible, IRMf...) ont permis de caractériser les dynamiques de population de neurones. En complément, le recours aux méthodes de simulation numérique (mathématiques ou réalistes) est de plus en plus répandu au sein des laboratoires de la section 27, et l'on commence à pouvoir relier les propriétés unitaires des neurones et la dynamique de la population (*i.e.* lier neurone et fonction neurale). Toutefois, il reste généralement à évaluer la pertinence de tels modèles numériques. Les techniques de dynamic-clamp, qui «introduisent» un neurone ou un sous-réseau numérique dans un réseau biologique, ou le recours aux dernières méthodes optogénétiques, qui permettent d'activer ou mettre sous silence une population neuronale spécifique, devraient permettre d'avancer encore dans la compréhension du fonctionnement des populations neuronales et dans leur contribution à l'expression des comportements.

Largement interfacées avec les précédentes, les recherches concernant les bases neurales de la perception (visuelle, auditive, haptique, olfactive, gustative...) et de la motri-

cité (regard, posture, locomotion) visent à comprendre l'émergence des propriétés collectives des réseaux sensoriels à partir des propriétés biophysiques des neurones et de leur connectivité. La perception de l'espace, de la scène et de l'objet et plus largement les interactions inter-modalitaires sont particulièrement étudiées, ainsi que le remodelage post-lésionnel des « cartes » sensorielles. Ces recherches utilisent fréquemment une approche parallèle chez le rongeur, le singe, l'homme sain et le patient, sont résolument pluridisciplinaires et multi-niveaux (neurones, populations neuronales, réseaux de structures, organismes intégrés) et font appel à une large panoplie d'approches méthodologiques complémentaires relevant de l'anatomie, de la physiologie, de la psychophysique et de l'imagerie cérébrale, ainsi que des neurosciences computationnelles. Ces recherches débouchent naturellement sur la recherche clinique, l'exploration fonctionnelle et la réhabilitation fonctionnelle.

## 4.1 ÉVOLUTION DES RECHERCHES EN NEUROSCIENCES INTÉGRATIVES

Plusieurs aspects marquants et interdépendants caractérisent l'évolution récente de la recherche dans le domaine des neurosciences intégratives. Nous développerons ici certains aspects qui nous paraissent stratégiques par les perspectives qu'ils offrent à la compréhension du fonctionnement du cerveau et au décodage des bases neurales de la plasticité cérébrale et des fonctions cognitives, ainsi qu'à la mise en place de solutions thérapeutiques à des pathologies du système nerveux.

### L'apport de l'imagerie cérébrale

Le développement des techniques d'instrumentation et d'imagerie non invasive permettant d'observer le cerveau au travail a

permis des avancées majeures dans l'étude des fonctions mnésiques chez l'homme sain, au cours du développement et du vieillissement, ou dans des conditions pathologiques. Les méthodes d'IRMf, TEP, EEG, MEG, utilisées séparément ou conjointement, permettent de catégoriser les réseaux mis en jeu dans le processus cognitif à l'étude et la dynamique neuronale (activité oscillatoire, synchronisation neuronale). Ces recherches trouvent depuis peu leur prolongement chez l'animal, à la fois chez le rongeur (anesthésié), et chez le singe éveillé engagé dans une tâche cognitive. Ces travaux qui n'en sont qu'à leur début permettent d'une part d'affiner les mécanismes des opérations cognitives par l'approche lésionnelle (réversible et irréversible) et de coupler ces études d'imagerie à des enregistrements électrophysiologiques. En effet, l'un des défis des prochaines années est d'intégrer dans un même schéma conceptuel les données électrophysiologiques obtenues depuis plusieurs décennies et celles issues de la neuroimagerie.

Une avancée majeure du domaine a concerné la compréhension des bases neurophysiologiques du signal d'IRMf. La démonstration que les signaux d'IRMf correspondent aux champs de potentiel locaux et non aux décharges neuronales, et sont donc au niveau régional un reflet des afférences et des computations locales, plutôt que des efférences, constitue un résultat fondamental, qui tout en restant discuté, permet d'envisager le couplage des méthodes hémodynamiques et électromagnétiques sur des bases neurophysiologiques solides. Il fournit une assise à l'interprétation des données expérimentales obtenues dans le domaine et constitue une incitation forte à favoriser la recherche translationnelle, de l'animal à l'homme, dans le domaine de la neuroimagerie cognitive. Des difficultés techniques majeures subsistent néanmoins : l'accès à la dynamique temporelle des réseaux cognitifs constituerait une avancée majeure, à la fois pour la compréhension du « comment ? » le cerveau exécute ses fonctions cognitives, mais également pour les modéliser, voire en réaliser des artefacts. Plusieurs travaux récents dans le domaine du traitement du signal, ainsi que l'accès à des données EEG

obtenues dans l'IRM, constituent des motivations fortes pour poursuivre cette voie de recherche.

On assiste par ailleurs depuis plusieurs années à une renaissance de la neuroanatomie grâce à l'avènement de méthodes de traitement automatisées et relativement sophistiquées des images 3D numériques morphologiques du cerveau ex-vivo (cryosections) comme *in vivo* grâce à l'IRM (Voxel-based-Morphometry, VBM, et imagerie du tenseur de diffusion, DTI). La DTI en particulier s'avère d'ores et déjà un outil fondamental complémentaire de l'imagerie fonctionnelle en ce qu'elle permet d'avoir accès à la structure des faisceaux de substance et donc au support anatomique de la connectivité cérébrale.

Il paraît également important d'avoir une activité de veille sur les méthodes d'imagerie moléculaire ciblant la neurotransmission (TEP notamment), composant fondamental de l'activité cérébrale, mais qui pour l'instant reste d'utilisation complexe pour l'étude des fonctions cognitives. Il sera également important de suivre ce que l'IRM à très haut champ (> 7 Tesla) pourrait amener à l'exploration des bases neurales des fonctions cognitives.

Sur le plan de l'imagerie fonctionnelle, il semble important de mentionner l'importance d'un nouveau type de paradigme en IRM fonctionnelle qui permet de dépasser les limites des paradigmes dits « block design » ou « event-related design » : ce type de paradigme, qui consiste à enregistrer en continu le signal BOLD au cours d'une tâche donnée, permet grâce à une analyse adaptée (analyse en composantes indépendantes par exemple, ICA) de révéler les réseaux intrinsèques sous-tendant les fonctions cognitives. Ce type de paradigme et d'analyse de données a notamment permis d'aborder l'étude des bases neurales de ce que l'on appelle le « brain default mode », un état mental, métabolique et neural particulier qui correspond aux périodes d'activité spontanée et non dirigée du cerveau.

Sur le plan des modèles et stratégies expérimentales, la cartographie du cerveau humain (CCH) suit désormais deux grandes

voies d'abord : l'étude des réseaux à grande échelle, et celle des réseaux locaux. La première s'appuie sur, et alimente, l'élaboration de modèles théoriques, comme ceux de Joaquim Fuster et Marsel Mesulam, qui font des échanges d'informations entre zones corticales à distance la base des processus cognitifs. Cette approche est l'approche de choix pour les fonctions hautement intégrées comme le langage, la mémoire, l'imagerie mentale, le raisonnement... La seconde, qui correspond d'avantage aux théories modularistes, cherche dans l'organisation sub-millimétrique du cortex désormais accessible par IRMF, les preuves des computations locales correspondant aux processus cognitifs. Elle est pour l'instant appliquée à l'étude des cortex primaires visuel, moteur, auditif...

Une autre piste prometteuse est celle de l'étude des relations entre génotype et phénotypes cérébral et comportemental. À côté des approches chez l'animal, l'étude des relations entre gènes et cognition pourrait bientôt bénéficier de l'exploitation de grandes bases, en cours de constitution, contenant des données génétiques, psychométriques et d'imagerie cérébrale. La possibilité de mettre en relation des bases de données génomiques/protéomiques, d'images microscopiques et macroscopiques du cerveau (anatomiques et fonctionnelles), et de données comportementales, constituerait également une rupture car elle permettrait un abord chez l'homme des relations entre gènes et cognition, la possibilité d'intégrer des données obtenues aux différents niveaux de l'architecture cérébrale au cours des activités cognitives constituant l'objectif ultime de ce domaine.

L'étude systématique des relations entre cerveau et fonctions cognitives va être au centre des activités à court terme de nombre de laboratoires, en particulier de la section 27, et ce chez l'animal, l'homme sain mais également au cours des pathologies neurologiques et psychiatriques. Dans ce contexte, l'étude du développement et du vieillissement des bases neurales de la cognition constitue certainement une des priorités compte tenu de la demande sociétale dans ce domaine. Le développement de ce domaine de recherche néces-

site l'effacement des barrières entre disciplines scientifiques concernées par les relations cerveau-pensée : psychologie, neurosciences et modélisation. Une recherche efficace dans ce domaine impose la constitution d'équipes pluridisciplinaires, ce qui a été réalisé dans beaucoup de centres aux USA et en Europe, mais qui reste encore marginal au plan national.

### À la recherche du code neural

Le deuxième grand domaine d'étude du cerveau où des avancées importantes ont été réalisées concerne le décryptage du code neural. Des avancées significatives ont été rendues possibles notamment grâce aux progrès récents dans les méthodes d'enregistrement d'ensembles neuronaux chez l'animal éveillé en situation d'apprentissage (jusqu'à 150 neurones enregistrés simultanément). Les recherches actuelles mettent en lumière non seulement la sélectivité des fonctions neurales, comme le codage de représentations de l'espace par les neurones de l'hippocampe, le codage et le maintien de l'information en mémoire à court terme ainsi que les opérations neuronales contrôlant la planification de l'action dans des aires du cortex frontal, mais aussi la coopération des différents réseaux neuronaux mis en jeu depuis les étages sensoriels jusqu'aux régions les plus intégratives ; coopérations dynamiques étudiées par l'analyse de couplages temporels d'activité neuronale, de synchronisations, d'oscillations et de propagation d'activité dans des réseaux distribués. Les succès de ces approches reposent sur des enregistrements électriques ou optiques multisites *in vivo* et des méthodes performantes d'analyse du signal impliquant modélisation mathématique et statistique. Ces recherches devraient permettre de détecter la formation temporaire d'assemblées de neurones à des moments précis où le cerveau apprend et met en œuvre différents processus de mémorisation, d'en disséquer les codes et d'aboutir à la formalisation de modèles dynamiques reposant sur les propriétés d'état des réseaux de neurones activés au cours de différentes phases du traitement de l'information mnésique.

### Les mécanismes cellulaires et moléculaires

Le troisième domaine qui a connu des avancées spectaculaires concerne les mécanismes cellulaires et moléculaires des processus cognitifs. D'un côté, les approches neurophysiologiques et de nouvelles méthodes d'imagerie cellulaire ont permis des percées importantes dans l'analyse des mécanismes de communication intercellulaire et de plasticité neuronale impliqués dans la formation et la conservation des souvenirs. Dans le cadre de la post-génomique fonctionnelle, la connaissance de plus en plus approfondie des génomes a ouvert de nouveaux défis en neurosciences de la mémoire qui vont de l'identification de la fonction des gènes et protéines neuronales au développement d'outils de diagnostic et de médicaments. Ces approches ont permis l'identification de certaines voies de signalisation neuronales qui servent les processus de plasticité et de mémoire, depuis l'activation des récepteurs et canaux ioniques à la surface des neurones, aux cascades d'activation de protéines intracellulaires et de communication intercellulaires, jusqu'à la régulation de gènes et de protéines neuronales aboutissant à un véritable remodelage des réseaux neuronaux par l'expérience ; mécanismes dont nous commençons seulement à entrevoir l'organisation et le fonctionnement normal. Par exemple, l'étude de modèles murins obtenus par la mise en œuvre des techniques de transgénèse, de mutagenèse, ou d'outils d'analyse génomique et protéomique à grande échelle et d'intervention sur des cibles moléculaires (RNAi, vectorologie etc.), est devenue incontournable pour la compréhension des mécanismes moléculaires et génétiques complexes qui contrôlent la genèse, le fonctionnement et les adaptations des réseaux neuronaux par l'expérience. Ces dernières années ont aussi été marquées par la reconnaissance de l'importance des régulations par l'expérience des programmes d'expression de gènes dans les neurones qui sous tendent le remodelage fonctionnel et structurel des réseaux de neurones à la base de la formation des souvenirs, ainsi que la mise en lumière de l'importance et de la

complexité des régulations épigénétiques, des thèmes en émergence qui seront déterminants pour la compréhension du fonctionnement et des dysfonctionnements du cerveau dans de nombreuses pathologies. Les objectifs dans le domaine sont d'élucider la composition de ces complexes multimoléculaires, leurs règles d'assemblage, leur dynamique et leur régulation pour comprendre leur rôle dans la physiologie des réseaux dont ils conditionnent les propriétés. D'autres aspects clé concernent les interactions entre les grands systèmes neuro-modulateurs (dopamine, sérotonine, acétylcholine etc.) et les réseaux de traitement de l'information, ainsi que les relations entre motivation et mémoire, émotion et mémoire. Grâce à ces connaissances, au développement de nouveaux modèles animaux et au renforcement des interactions entre neurosciences intégratives, génétique moléculaire et génomique fonctionnelle, un effort particulièrement intense a été réalisé dans le domaine des bases neurales et moléculaires des dysfonctionnements de la mémoire en relation avec le vieillissement cognitif ou certaines atteintes neurologiques ou psychiatriques caractérisées par des perturbations des fonctions mnésiques. Ces nouvelles connaissances sont déterminantes pour comprendre comment les mécanismes pathologiques perturbant ou détruisant les cellules nerveuses entraînent des conséquences fonctionnelles dévastatrices, responsables de handicaps psychiques majeurs. Les liens avec le médicament et les biotechnologies sont essentiels dans ce domaine du fait des immenses besoins de traitements nouveaux plus efficaces pour de nombreuses conditions qui affectent les capacités d'apprentissage et de mémoire, depuis la plainte mnésique associée au vieillissement jusqu'aux maladies neurologiques et psychiatriques.

## La construction du cerveau

La compréhension du fonctionnement du système nerveux nécessite aussi de connaître sa mise en place au cours du développement. La construction du cerveau obéit à un programme génétique modulé par les interactions

avec l'environnement pour aboutir à la formation d'un cerveau fonctionnel. Cette adaptation, sous la double influence des gènes et du milieu, est faite d'apprentissages et de mémorisations et repose sur les mécanismes de plasticité neuronale qui s'expriment au niveau cellulaire comme au niveau des circuits complexes. Les défaillances de la production des neurones, de leur migration, de leur intégration dans des réseaux fonctionnels et de la stabilisation de ces réseaux au cours du développement embryonnaire ou post-natal contribuent à des syndromes neurologiques variés comme le retard mental, l'autisme, la schizophrénie ou l'épilepsie. Avec l'âge, les capacités de plasticité diminuent, s'accompagnant d'altérations progressives des fonctions d'apprentissage et de mémoire. Comprendre comment le cerveau se construit, comment les réseaux de neurones sont ajustés durant la vie, comment leurs propriétés s'altèrent au cours du vieillissement sont autant de défis qui sont d'une importance considérable pour la santé et la société.

## Les cellules souches neurales

Enfin, des découvertes spectaculaires comme la genèse de nouveaux neurones chez l'adulte dans certaines régions du cerveau chez de nombreuses espèces, y compris chez l'Homme, ouvrent des horizons insoupçonnés sur les capacités de plasticité du cerveau. Là encore, de nouveaux outils moléculaires ouvrent la voie d'une analyse du rôle des cellules souches neurales et de la neurogenèse adulte dans les processus mnésiques. Sont particulièrement étudiées les capacités régénératives des cellules souches ou progénitrices neurales, les possibilités de leur (re)programmation, le contrôle de leur prolifération, les modalités de leur différenciation, de leur survie et de leur intégration fonctionnelle dans les réseaux neuronaux dans des situations physiologiques et pathologiques. L'accroissement des connaissances dans ces domaines, le développement de modèles animaux pertinents pour les analyses fonctionnelles et les tests de stratégies thérapeutiques seront d'une importance considérable sur le plan fonda-

mental comme biomédical. Les connaissances sur l'implication des neurones néoformés chez l'adulte dans des fonctions cognitives et affectives, sur les altérations des mécanismes de prolifération ou de survie neuronale dans différentes neuropathologies et les premières tentatives de thérapie cellulaire ou de redirection des précurseurs neuronaux vers des zones déficientes ou lésées chez l'animal, qui permettront peut-être un jour le réapprovisionnement du cerveau en neurones au moyen de cellules souches, sont des enjeux majeurs de la recherche. Elles ouvrent de nouveaux défis pour la réparation du système nerveux lésé ; un des grands espoirs des thérapies du futur.

## 4.2 STRUCTURATION NATIONALE

Les recherches sur les bases neurales de l'apprentissage et de la mémoire sont au cœur de la section 27, et alimentent le GDR 2905 – Neurosciences de la Mémoire (directeur : Serge Laroche). Ce GDR, créé en 2005, regroupe 330 personnes issues de 32 équipes de recherche. Son objectif est de promouvoir les recherches concernant : *i.* L'organisation et la dynamique des systèmes de mémoire ; *ii.* Le code neural de la mémoire ; *iii.* Les mécanismes cellulaires et moléculaires de la mémoire ; *iv.* Les bases neurales des pathologies de la mémoire. Les recherches dans ces domaines ont connu ces dernières années un essor considérable qui aboutit à une véritable révolution dans la connaissance du fonctionnement du cerveau ainsi des mécanismes neuronaux qui nous permettent de garder des traces de nos expériences passés et de construire une représentation du monde qui nous entoure.

## 4.3 CONCLUSION SUR LES NEUROSCIENCES INTÉGRATIVES

Si de nombreuses recherches ont permis d'accumuler des connaissances sur le fonction-

nement du cerveau à plusieurs échelles d'organisation, l'intégration de ces descriptions dans un modèle du fonctionnement pouvant expliquer des fonctions cognitives comme l'apprentissage et la mémoire en prenant en compte l'ensemble des niveaux d'analyse et d'organisation du cerveau est encore un objectif lointain. L'avenir dans ce domaine sera d'établir des liens entre les différentes échelles d'observation, par l'expérimentation et par la modélisation, pour comprendre comment les fonctions supérieures du cerveau comme la mémoire, la conscience ou la pensée peuvent émerger de la réunion de propriétés locales au niveau des constituants élémentaires des cellules nerveuses, des réseaux de neurones et de leur plasticité, et de l'interaction entre cerveau et environnement. C'est à ce prix que les propriétés fonctionnelles du système nerveux pourront être réellement expliquées et que des interventions thérapeutiques rationnelles et innovantes pourront être développées. L'apport des mathématiques et des neurosciences computationnelles sera essentiel pour synthétiser et modéliser l'énorme masse de données accumulées. D'autres secteurs d'application qui ne cessent de croître bénéficieront de ces avancées, en neuroinformatique, en robotique, neuroprothétique et nouvelles interfaces cerveau-machine, en particulier dans les domaines dédiés aux hautes technologies pour la santé.

# 5 – LES NEUROSCIENCES CLINIQUES

## 5.1 LES MALADIES NEURODÉGÉNÉRATIVES

Un des enjeux capitaux de ces dernières années a concerné les travaux de recherches cliniques et biomédicales dans le domaine des maladies neurodégénératives, et en particulier celles liées à l'âge. En effet, l'augmentation

constante de la longévité humaine en France a rendu prioritaires les études sur les maladies neurodégénératives chez l'Homme âgé, avec comme cible privilégiée les personnes atteintes de la Maladie d'Alzheimer ou de pathologies apparentées. Ces recherches cliniques vont de la recherche biomédicale à la recherche en sciences humaines et sociales la plus appliquée, de par le fort impact sociétal qui en découle.

Ces dernières années, le développement d'outils diagnostic pertinents permettant d'identifier des biomarqueurs précoces a permis des avancées significatives dans le diagnostic, le pronostic, le traitement et aussi la prévention des maladies neurodégénératives. Ces progrès sont dus en particulier à l'apport de techniques modernes telles que la protéomique, la transcriptomique, l'imagerie fonctionnelle, l'électrophysiologie, car ces techniques couplées aux mesures de vigilance, perceptions sensorielles et performances cognitives (mémoires épisodique et spatiale, langage, fonctions exécutives), contrôle moteur, ont permis une approche intégrative et pluridisciplinaire des processus impliqués dans la neurodégénérescence. Les applications des neurosciences dans ces domaines cliniques sont majeures, puisque les avancées obtenues permettent de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau en relation avec les processus mentaux. Il a en particulier été possible d'approfondir de façon très significative la connaissance des réseaux corticaux impliqués dans le contrôle des fonctions cognitives et motrices, ouvrant des pistes thérapeutiques innovantes. Par exemple, l'analyse de l'implication de différents types de récepteurs, par l'utilisation d'animaux knock-out ou knock-in ou de lignées génétiques mutantes, permet de comprendre et d'affiner le rôle des grands systèmes de neurotransmission lors de maladies neuro-dégénératives de type Parkinson, Huntington ou Alzheimer. Les études cliniques qui en ont découlé ont permis récemment de mettre en évidence de nouvelles populations neuronales (cholinergiques) impliquées dans le contrôle moteur chez les malades atteints de la maladie de Parkinson, ouvrant des pistes thérapeutiques complémentaires voire

alternatives aux traitements impliquant les systèmes neuronaux dopaminergiques. De manière parallèle, des études sur des patients atteints de la maladie de Huntington ont révélé l'existence de réseaux cérébraux parallèles et complémentaires, permettant d'envisager différentes cibles thérapeutiques et augmentant de ce fait les potentialités d'intervention au niveau biomédical.

La France possède à l'heure actuelle un grand nombre de compétences et d'équipes qui assurent une production scientifique de qualité, et dont les domaines d'expertise correspondent en grande partie aux domaines scientifiques couverts par la Section 27. En effet, du fait de l'importance dans l'approche aussi bien fondamentale que clinique des fonctions cognitives, motrices, et de leur contrôle cérébral, il n'est pas étonnant de trouver nombres de laboratoires du CNRS affiliés à cette Section du Comité National (Ile de France, Bordeaux, Lille, Lyon, Strasbourg, Marseille).

Les applications cliniques ont pu bénéficier des apports de la recherche fondamentale, notamment à travers la compréhension des mécanismes sous-jacents aux processus neurodégénératifs et à la mise en évidence de comportements et modes de vie à risque. La France est d'ailleurs réputée pour ses études de cohortes engagées depuis de nombreuses années. À l'inverse, il a été possible d'identifier des modes de vie et des traitements permettant de ralentir voire même de repousser les maladies neurodégénératives. Certaines pistes thérapeutiques ont exploré les effets bénéfiques de certaines hormones ou de diverses modifications d'ordre alimentaire.

Un constat actuel plus limitatif peut être fait en ce qui concerne la mise au point de molécules à visée thérapeutique dans le domaine des maladies neurodégénératives. En effet, force est de constater une certaine lacune dans les modèles pré-cliniques existants, qui fragilise le processus de développement thérapeutique et donc freine la mise sur le marché des médicaments. Il est urgent de renforcer le lien entre recherche fondamentale sur modèles animaux et recherche clinique chez l'homme, notamment en diversifiant les

espèces (rongeurs, lagomorphes, primates) et les types de modèles animaux (modèles spontanés ou transgéniques).

Afin de poursuivre les avancées de la recherche clinique dans le domaine des maladies neurodégénératives, il est donc primordial de soutenir le développement de modèles animaux adaptés aux applications à l'Homme, de renforcer les ponts entre recherche fondamentale et recherche clinique, et d'investir de manière plus significative dans le développement de plateformes de recherche qui favorisent le travail collaboratif et synergique. Les moyens déjà mis en œuvre doivent être poursuivis et même renforcés, dans le but d'augmenter le nombre d'équipes de recherche impliquées dans ces travaux au niveau fondamental comme appliqué, et de favoriser l'installation d'infrastructures de recherche clinique autour de projets originaux et structurants.

## **5.2 RECHERCHE TRANSLATIONNELLE EN PSYCHIATRIE**

La recherche en psychiatrie et en santé mentale recouvre un large champ de discipline allant des aspects les plus fondamentaux des neurosciences jusqu'aux sciences humaines et

sociales. Les problématiques soulevées par les troubles mentaux et les troubles du comportement concernent essentiellement les relations entre le fonctionnement du cerveau, du comportement, de la pensée et l'adaptation à l'environnement sans omettre la perspective développementale. Ainsi, l'enjeu majeur des prochaines années sera de créer des liens entre les chercheurs des disciplines représentées par la section 27 et des commissions interdisciplinaires avec les cliniciens. C'est dans cet esprit que s'inscrit la recherche translationnelle en psychiatrie. Plusieurs initiatives sont déjà reconnues en France à travers des projets transversaux entre équipes regroupant chercheurs et cliniciens démontrant l'intérêt du partage d'expérience entre chercheurs et cliniciens. (Stimulation cérébrale profonde du noyau sous thalamique dans le TOC, stimulation magnétique transcrannienne répétitive guidée par neuronavigation dans les hallucinations, innovations pharmacologiques dans l'autisme, les troubles anxieux et des addictions, aide au dépistage d'une vulnérabilité à la schizophrénie aux troubles bipolaires et à l'autisme. Depuis 2009, l'Institut Thématique Multi-Organisme (ITMO) *Neurosciences, Sciences Cognitives, Neurologie, Psychiatrie*, soutient l'organisation de regroupements thématiques nationaux. Cet effort soutenu également par les associations de patients et des familles de patients doit être renforcé, dans le but d'augmenter les collaborations internationales.



# 28

## BIOLOGIE VÉGÉTALE INTEGRATIVE

### *Présidente*

Hélène BARBIER-BRYGOO

Marc BERGDOLL

Florence CORELLOU

Jean-Marc DERAGON

Dominique GAGLIARDI

Thierry GAUDE

Deborah GOFFNER

Thierry LAGRANGE

Thierry LANGIN

Marc-Henri LEBRUN

Michel LEBRUN

Laurence LEJAY-LEFÈVRE

Claire LURIN

Herrade NEHLIG

Soufian OUCHANE

Sophie DE PEINDRAY D'AMBELLE

Philippe POTIN

Christophe ROBAGLIA

Dominique RUMEAU

Marylin VANTARD

Françoise VEDELE

Le présent rapport résulte d'un travail de réflexion conjoint entre la section 28 et un groupe de travail sur la biologie végétale, composé d'experts représentant le CEA, le CIRAD, le CNRS, l'IRD et l'INRA.

Le précédent rapport de conjoncture de la section 28 présentait un état des lieux très détaillé de la recherche en Biologie Végétale qui reste d'actualité et ne sera pas repris ici. Différents rapports nationaux et internationaux publiés ces dernières années et donnant une vision prospective de la recherche sur les modèles végétaux peuvent également être consultés (voir Annexe 2). Le présent document s'attache à dégager, en fonction des grands enjeux de recherche et de société et des atouts du dispositif français, les grandes lignes des actions à mettre en place. Il est divisé en trois parties qui présenteront successivement : (i) les enjeux auxquels doit répondre la Biologie Végétale et une rapide présentation des forces en présence, (ii) les questions scientifiques et biologiques qui retiennent l'attention sur le plan stratégique et sur lesquelles la position forte des équipes françaises et leur compétitivité doivent être soutenues, et (iii) les outils et ressources à développer ou à renforcer pour répondre aux questions de recherche majeures, pour structurer et renforcer la communauté travaillant sur les végétaux (au sens large) et ainsi faire face aux grands défis de la recherche dans le domaine.

# 1 – ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX DE LA RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE EN FRANCE

## 1.1 LES ENJEUX DE LA RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

### Des enjeux scientifiques

Les végétaux ont des propriétés remarquables qui constituent un champ d'étude original et complémentaire aux modèles animaux et microbiens. Au cours de l'évolution, les végétaux, organismes généralement fixés et photosynthétiques, ont intégré dans leur fonctionnement les contraintes liées à l'environnement abiotique (lumière, humidité, température...) et biotique (microorganismes...). Ceci se traduit par une grande diversité de stratégies métaboliques et développementales. Les eucaryotes photosynthétiques présentent une très grande diversité phylogénétique avec divers groupes ayant évolué vers une organisation multicellulaire de façon indépendante. Les recherches en biologie végétale permettent ainsi de répondre à des questions fondamentales pour la compréhension du vivant et de sa complexité. De plus, la diversité des modèles végétaux permet de répondre à des enjeux scientifiques importants non seulement dans le champ de la biologie et de la santé, mais également dans celui des problématiques liées à l'environnement.

Les recherches sur les plantes sont à l'origine de contributions fondamentales et originales dans le domaine de la biologie. Une première raison est que les plantes partagent un certain nombre de caractéristiques avec les animaux et les champignons comme le contrôle génétique, la régulation transcriptionnelle, des modules de signalisation communs, les fonctions du cytosquelette ou la présence de cellules souches. De ce fait, la recherche en biologie végétale a contribué à des avancées importantes telles que l'identification des bases

de la morphogenèse cellulaire et des relations de la cellule à l'organisme, le concept d'organogenèse *de novo* (*vs* préformation), l'héritabilité des caractères et l'inactivation épigénétique dépendante des petits ARN. De plus, l'existence de domaines de recherche spécifiques aux végétaux, tels que la photosynthèse, l'organogenèse continue, les mécanismes de signalisation spécifiques, la totipotence et une plasticité extrême en réponse aux contraintes de l'environnement, justifient un intérêt particulier. Les plantes sont également très différentes des animaux sur le plan structural, avec la présence autour des cellules d'une paroi qui leur permet d'exploiter et de guider une forte pression de turgescence interne.

Résoudre la complexité des systèmes biologiques végétaux pour en tirer le meilleur parti ne pourra se faire qu'en accumulant tout d'abord les connaissances sur des organismes modèles pour les intégrer ensuite à une échelle supérieure. Le nouvel élan de la recherche en biologie végétale repose donc également sur la diversification des systèmes modèles. Ces nouveaux modèles doivent permettre un transfert horizontal de connaissances vers des espèces d'intérêt agronomique dont la manipulation est plus complexe. L'étude de certains d'entre eux se justifie par elle-même du fait de propriétés intrinsèques originales dont la compréhension peut aboutir à leur exploitation propre, comme par exemple les lignées eucaryotes photosynthétiques qui peuvent être phylogénétiquement éloignées et présenter des métabolismes originaux.

*Arabidopsis thaliana* reste l'espèce de référence en ce qui concerne les plantes supérieures, en raison du recul acquis sur ce système modèle permettant dans la pratique d'être plus efficace pour adapter ou développer de nouvelles approches (dont les approches globales dites « omiques » intégrant les données génomiques et post-génomiques). La disponibilité d'outils et de technologies de pointe et de concepts acquis sur ce système via la compréhension approfondie de sa biologie sont d'autres atouts d'*Arabidopsis*. Ces mêmes outils ouvrent dès à présent la voie pour aller au delà de cette espèce pionnière, et permettre

des études comparatives qui amélioreront la compréhension du végétal en général et conduiront à un meilleur transfert des connaissances vers des espèces non-modèles, d'importance économique et/ou écologique, ainsi que la découverte de caractères originaux d'autres végétaux. L'adoption d'un nombre limité d'espèce de référence pour les procaryotes et eucaryotes photosynthétiques, allant des algues jusqu'aux arbres, permettra de mettre en lumière les éléments communs et la diversité et de tirer profit de la spécificité des organismes photosynthétiques. Par exemple, le soutien français à l'émergence de modèles tels que *Ostreococcus* et *Ectocarpus* commence à porter ses fruits. Cependant le nombre d'équipes travaillant sur ces modèles non conventionnels, reste très réduit, ce qui fragilise la pérennité des recherches sur des modèles originaux en France.

## Des enjeux économiques et sociétaux

Le défi actuel majeur est de savoir comment exploiter durablement la biomasse végétale et plus généralement les organismes photosynthétiques. Ceci revient non seulement à contribuer au développement d'une agriculture respectueuse de l'environnement et de la santé humaine mais également à mettre en œuvre des méthodes qui préservent les ressources naturelles et la biodiversité en protégeant les écosystèmes des déséquilibres induits par les changements climatiques et la surexploitation des milieux naturels. Le contexte économique mondial et la compétitivité de l'agriculture européenne face aux économies dominantes (USA) et émergentes (Chine, Inde, Brésil) sont d'autres aspects importants à prendre en compte. La démarche actuelle pour l'innovation en agriculture (sur les espèces agronomiques mais aussi sur les espèces végétales moins conventionnelles telles que les algues qui représentent d'importantes ressources aquatiques en France) ne semble pas suffisante devant l'importance des enjeux du futur. Il est également nécessaire de renforcer le transfert de nos connaissances génériques vers des espèces cultivées et de produire

plus de connaissances sur la biologie de la plante et son fonctionnement intégré dans l'environnement.

L'exploitation de la biomasse végétale terrestre et aquatique doit pouvoir répondre aux besoins alimentaires, sanitaires et sociétaux (produits d'intérêt pharmaceutique, bio-remédiation, nouveaux matériaux de construction, nouveaux synthons de la chimie verte et bio-énergies) qui vont croissant avec l'évolution démographique. L'accroissement estimé de la population mondiale est de 2,2 milliards d'ici 2050. L'alimentation et la qualité de vie des populations dépendront de manière prépondérante des progrès réalisés en agriculture et en ingénierie des végétaux. L'exploitation des ressources agricoles, forestières, aquacoles ne se fera durablement que sur la base de solides connaissances en biologie végétale.

L'amélioration génétique a contribué fortement à l'augmentation historique du rendement des cultures. À l'avenir, le succès de l'agriculture dépendra de la génération de nouvelles cultures qui devront combiner un rendement plus élevé et une meilleure qualité, avec des capacités accrues de résistance aux stress biotiques et abiotiques (sécheresse, maladies, parasites), dans des conditions d'apport réduit en engrais et en produits phytosanitaires. Notre compréhension actuelle des bases moléculaires de la domestication reste rudimentaire, même si quelques gènes clés ont été identifiés. De plus, la manipulation de gènes uniques ou de traits phénotypiques isolés ne paraît pas suffisante pour atteindre tous les objectifs recherchés et n'est pas compatible avec la nécessité d'une vision intégrée du développement de la plante, seule démarche possible pour résoudre les problématiques complexes et répondre aux enjeux auxquels nous sommes confrontés.

L'exploitation d'espèces de champignons, d'algues et de microalgues a été jusqu'à présent freinée en raison d'un retard de connaissance de ces systèmes. Ces organismes constituent néanmoins un réservoir important de biodiversité et une source presque infinie de bioproduits directement exploitables pour l'alimentation, l'énergie, la para-pharmacie ou

la cosmétique. Ils constituent dans certains cas une bonne alternative d'usine cellulaire pour la synthèse de produits recombinants. La production de masse de micro-organismes végétaux ou fongiques en milieu confiné ou les cultures en mer de végétaux marins sont des alternatives prometteuses à l'occupation des sols ou au manque de ressources en eau qui attirent l'intérêt des industriels. Par ailleurs, les modèles unicellulaires permettent d'aborder des questions biologiques génériques de manière simplifiée. Le succès grandissant de ces nouveaux modèles passera, ici encore, par une compréhension approfondie de leur biologie.

### Des enjeux aux interfaces

Au-delà du développement nécessaire des méthodes de production et d'analyse de larges jeux de données (séquençage à haut débit, protéomique, métabolomique, phénotypage à haut débit), puis de leur exploitation pour passer d'une donnée brute à une information biologique pertinente (bioinformatique, bases de données, datamining, modélisation), l'un des enjeux majeurs des prochaines années en biologie végétale sera de rassembler des réseaux inter-disciplinaires pertinents autour d'une question biologique donnée. Les interfaces suivantes méritent une attention particulière :

- biologie/mathématique, afin d'associer aux biologistes, dès la conception des expériences, des biomathématiciens, des biophysiciens, des bioinformaticiens et de généraliser l'usage des statistiques et des méthodes de modélisation

- biologie/physique, en particulier dans le domaine de l'imagerie pour développer par exemple la manipulation de molécules uniques et ainsi passer de l'échelle nano à l'échelle macro, la visualisation en temps réel à différents niveaux d'intégration, les techniques de tomographie pour les tissus végétaux, les outils d'analyse de la cellule unique et d'étude des différents types cellulaires.

- biologie/chimie, par exemple pour mesurer les changements métabolomiques liés aux interactions entre la plante et son environne-

ment et développer les approches de chimio-génomique comparative.

### Des enjeux de formation

Du fait de l'évolution très rapide de la biologie en général et des sciences végétales en particulier, il semble important de repenser la formation des chercheurs pour leur faire acquérir les compétences nécessaires à l'application des méthodologies modernes (concepts, méthodes et outils) afin de favoriser une vision plus intégrative et plus prédictive de la biologie végétale. Ceci nécessitera le développement de formations pluridisciplinaires aussi bien pour les chercheurs travaillant sur des questions génériques que pour ceux s'adressant à des questions plus finalisées touchant l'agronomie et l'agriculture.

Il est également important d'améliorer nos efforts de vulgarisation et de diffusion des connaissances en biologie végétale vers la société, afin d'attirer des jeunes chercheuses et chercheurs vers les questions spécifiques du végétal, et d'augmenter le niveau global de compréhension de la population pour ces problèmes qui touchent à de nombreuses questions sociétales (maintien de la biodiversité, évolution, perception des risques environnementaux et sanitaires, impact des biotechnologies, etc.).

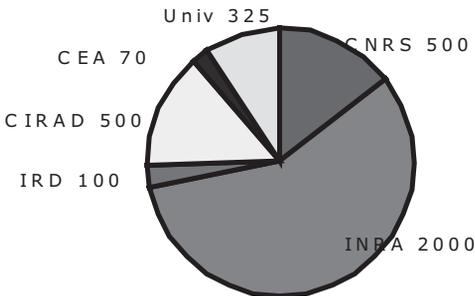
## 1.2 LES FORCES EN BIOLOGIE VÉGÉTALE EN FRANCE

Comme le soulignait le précédent rapport de conjoncture de la section 28, la force de la communauté des scientifiques travaillant sur les modèles végétaux réside, pour l'essentiel, dans son organisation originale au sein de partenariats forts entre le CNRS, l'INRA, le CEA, le CIRAD, l'IRD et certains établissements d'enseignement supérieur (Universités, ENS, Agro-ParisTech, Montpellier SupAgro, etc.). Ainsi, la très grande majorité des laboratoires français de biologie végétale est constituée par des UMR

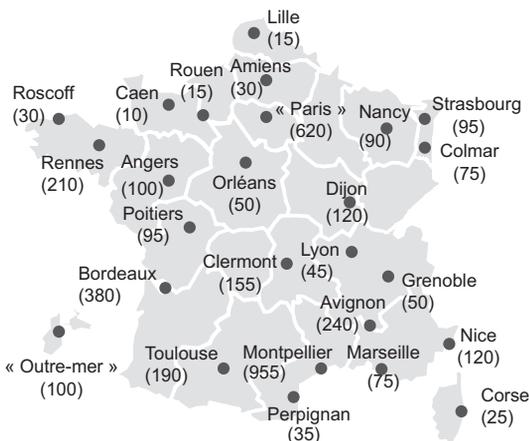
impliquant ces différents partenaires (sur les 16 unités ayant un rattachement principal à la section 28, on compte 14 UMR et 2 UPR).

La figure ci-dessous montre la répartition des personnels permanents (chercheurs, enseignants-chercheurs, IT et IATOS) entre les différents organismes, ainsi que la répartition géographique des forces sur le territoire national. On notera la présence de deux pôles très importants, en région parisienne et à Montpellier. La communauté compte au total environ 3500 permanents, auxquels il faut ajouter les non-permanents composés essentiellement de doctorants et post-doctorants (au sein des unités rattachées à la section 28, on compte 368 permanents CNRS, 559 permanents non-CNRS et 417 non-permanents).

Répartition des personnels permanents par organisme



Répartition géographique



## 2 – QUESTIONS MAJEURES EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

### 2.1 DYNAMIQUE CELLULAIRE ET DÉVELOPPEMENT

#### Introduction

Le séquençage massif des génomes et l'utilisation abondante des approches de transcriptomique et de protéomique pour répondre à diverses questions biologiques a eu deux conséquences majeures en biologie : (i) révéler l'existence de nombreux réseaux moléculaires avec la découverte d'interactions insoupçonnées entre ces derniers, et (ii) favoriser la rencontre entre biologistes et chercheurs d'autres disciplines, notamment des bioinformaticiens et des physiciens. Cette nouvelle dynamique en biologie a conduit à considérer un organisme vivant comme un système complexe, c'est-à-dire composé d'ensembles d'entités (molécules, cellules, etc.) qui interagissent selon des règles locales simples mais dont les interactions conduisent à l'émergence de nouvelles propriétés collectives, associées à des niveaux d'organisation plus complexes. Ainsi, pour une analyse intégrative en biologie, l'étude d'une cellule ou d'un organisme doit être réalisée à la fois au niveau des mécanismes moléculaires qui régissent leurs activités mais également à un niveau supérieur de complexité pour comprendre comment les parties individuelles (territoires cellulaires, tissus, etc.) interagissent et s'organisent pour former des structures d'ordre supérieur. Cette dualité de connaissance est indispensable, et privilégier l'une par rapport à l'autre ne conduirait qu'à une vision incomplète voire erronée des processus biologiques.

## **Comprendre les bases cellulaires du développement : des assemblages moléculaires aux propriétés cellulaires**

### **Comprendre comment les molécules s'assemblent en modules fonctionnels et en réseaux de régulation**

Comprendre comment les molécules interagissent pour former des modules structuraux ou fonctionnels est un prérequis indispensable à une meilleure compréhension de l'organisation et du fonctionnement de la cellule. Le module structural le plus caractéristique de la cellule végétale est la paroi cellulaire dont la composition et la dynamique d'organisation sont variables selon les types cellulaires, l'âge, les contraintes développementales ou environnementales. D'autres complexes macromoléculaires demandent encore à être mieux caractérisés, et certainement à découvrir, comme ceux impliqués dans la dégradation des protéines (protéasome), la formation de vésicules membranaires et leur trafic (machineries de transport intracellulaire), le transport des protéines entre compartiments endomembranaires (voies de sécrétion, recyclage, stockage et/ou dégradation vacuolaire, etc.), la traduction des protéines, la régulation de l'expression des gènes, les fonctions des organites, etc. Ces modules fonctionnels peuvent également prendre la forme de réseaux dans lesquels les protéines interagissent en cascades. C'est le cas par exemple pour les voies de signalisation qui impliquent des interactions de type ligand-récepteur pour transmettre un message de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule. Ces signaux peuvent être des hormones de natures variées (auxines, brassinostéroïdes, acides gibbéréliques, cytokinines, strigolactones, etc.), des peptides, des polysaccharides, voire des contraintes mécaniques. Nombre de ces récepteurs sont encore inconnus. Il est à souligner que le génome d'*Arabidopsis*, contrairement à ceux des mammifères, présente une large famille de plus de 400 récepteurs kinase membranaire putatifs et une autre famille de gènes codant plus de 1 000 peptides constituant des ligands potentiels de ces récepteurs. À ce jour, seul deux couples peptide-

récepteur kinase ont été clairement identifiés. Cet exemple illustre le fossé qui reste à combler dans certains cas, pour passer des données mécanistiques simples à leur intégration dans des réseaux plus complexes, nécessaire à une approche intégrative.

Les règles qui gouvernent ces assemblages macromoléculaires et les interactions entre molécules (protéines-protéines, protéines-acides nucléiques, protéines-polysaccharides ou lipides) devront être définies, en combinant différentes méthodes issues de la biochimie, de l'imagerie cellulaire et de la biophysique. En particulier, la structure des protéines, leurs concentrations cellulaires, leurs localisations sub-cellulaires et leurs possibles modifications post-traductionnelles (par exemple phosphorylation, ubiquitination) devront être déterminées. À terme, la somme des informations mécanistiques obtenues pour un complexe donné devrait nous permettre de prédire la structure et la dynamique de ce complexe pour une cellule particulière ou un instant donné.

D'un point de vue technologique, les techniques à haut débit telles que l'immuno-précipitation de la chromatine suivie de séquençage (ChIP-Seq), les cribles double hybride chez la levure et les analyses de protéomique d'interactions permettent la création de cartes d'interactions moléculaires qui seront ensuite utilisées pour établir des règles d'interaction. Par exemple, des modèles biophysiques ont été développés pour prédire des interactions entre facteurs de transcription/chromatine/ADN. Les règles émanant de ces modèles sont d'un grand intérêt car elles peuvent être utilisées dans différents contextes (différents tissus, différentes espèces). Une fois ces règles de base établies, la modélisation permet d'intégrer les informations et d'analyser les propriétés émergentes des réseaux.

## **Comprendre comment les éléments structuraux de la cellule s'assemblent et fonctionnent**

Les propriétés physiques des cellules végétales (forme, rigidité, polarité) définissent la forme générale de la plante entière. Ces propriétés dépendent largement de trois composants structuraux : la paroi cellulaire, le cytosquelette et le système membranaire.

Paroi cellulaire et cytosquelette. Les mécanismes qui sous-tendent l'expansion cellulaire, la croissance anisotrope ou la croissance polarisée d'une cellule restent encore mal compris. Il apparaît important d'approfondir nos connaissances sur la composition et l'architecture de la paroi cellulaire dans différents types de cellules, sur la nature des agents modifiant cette composition et comment ces modifications, liées à des changements dans les contraintes développementales ou environnementales, conduisent aux changements de formes de la cellule. Comment la cellule perçoit ces contraintes et quelles sont les voies de signalisation impliquées dans ces phénomènes sont également des questions auxquelles il est nécessaire de répondre. Les relations entre le cytosquelette et la paroi cellulaire et l'étude de leur dynamique lors des processus de croissance et de division cellulaire devront être analysées en détails en utilisant les nouveaux outils d'imagerie cellulaire. Enfin, au niveau d'un organe, les rôles joués par les différentes couches tissulaires dans la croissance et l'architecture devront être recherchés.

Système endomembranaire et organites. En plus de leur fonction de barrière à la diffusion des solutés et de délimitation de compartiments intracellulaires, les lipides des membranes biologiques se sont révélés être des composants essentiels dans le développement des organismes multicellulaires. Chez les plantes, les lipides membranaires ont été impliqués dans diverses voies de signalisation et jouent un rôle clé dans de nombreux processus développementaux (développement embryonnaire, germination des graines, croissance racinaire, germination du pollen et croissance du tube pollinique, signalisation

hormonale, réponse aux stimuli environnementaux tels que la lumière, le stress, la carence en sucre ou en phosphore). Il existe une véritable dynamique d'interaction entre des protéines du cytosol et certains lipides membranaires conduisant à l'établissement de complexes multiprotéiques variés. Selon la nature du complexe, des événements d'internalisation ou de bourgeonnement de membrane, de transports de vésicules entre compartiments intracellulaires, de fusion de vésicules, peuvent s'établir, conduisant à une redistribution de protéines membranaires et autres composants cellulaires. Ces mécanismes encore mal connus dans le détail jouent un rôle prépondérant dans la signalisation cellulaire et le transport de molécules, en régulant notamment la quantité des récepteurs et des transporteurs membranaires. Ils sont également cruciaux dans le dialogue entre organites au sein de la cellule ou dans les échanges de solutés, métabolites, hormones et autres messages moléculaires entre cellules d'un même tissu ou entre cellules de différents tissus et/ou organes. Ces systèmes de transport sont essentiels pour divers aspects de la physiologie de la plante comme la nutrition, le développement, la détoxification, les réponses aux facteurs biotiques et abiotiques.

L'amélioration de nos connaissances sur l'homéostasie membranaire, les machineries de transport et les relations entre organites fournira des indications fondamentales pour mieux comprendre les voies de signalisation et de transport impliquées dans la croissance et le développement des plantes.

## **La plante comme un système complexe : des cellules à l'organisme**

### **Signalisation à courte et longue distance : comment les molécules de signalisation sont-elles distribuées ?**

Les cellules réagissent à des informations positionnelles provenant d'une variété de molécules. Il peut s'agir d'hormones, de métabolites, produits localement avec un effet à

courte distance ou au contraire transportés sur de longues distances (MeJA, miRNA, auxine, florigène, etc.) de manière active ou passive. L'effet de concentration est un facteur primordial dans les réponses hormonales (exemple de l'auxine) avec la mise en place de gradients de molécules signal. Par exemple, une même hormone peut avoir des effets antagonistes sur l'élongation cellulaire en fonction de sa concentration. Comprendre comment se met en place ces gradients, être capable de les détecter au niveau cellulaire et tissulaire, et déterminer les effets antagonistes ou rétroactifs des molécules signal constitue un véritable challenge. Une autre particularité des plantes réside dans le fait que l'identité cellulaire et l'adaptation environnementale est aussi dépendante d'un important trafic de macromolécules (ARN, protéines) à longue et courte distance. L'organisation de ce niveau de signalisation est encore largement inconnue.

### **De l'identité cellulaire aux processus développementaux**

En réponse aux stimuli internes ou environnementaux, la cellule active ou réprime l'expression de certains gènes, modifie l'activité de protéines, leur localisation subcellulaire, leur abondance, génère ou dégrade des molécules spécifiques, et va ainsi acquérir un nouvel état physiologique qui pourra par exemple conduire à sa division, sa différenciation, voire sa mort. Cette nouvelle activité cellulaire résulte de l'intégration de différents réseaux d'interactions moléculaires (voies de signalisation, réseaux de régulation transcriptionnelle et traductionnelle, voies de trafic intracellulaire, voies métaboliques, etc.). Il est par conséquent important, non seulement d'identifier les composants de ces réseaux, mais également d'en obtenir une vision intégrée, de connaître comment ces réseaux réagissent aux stimuli et quelles en sont les cibles. Ceci requiert l'intégration de données multiples qui nécessite des approches de modélisation.

Les processus développementaux impliquent un ensemble de cellules soumis à divers

stimuli d'ordre chimique (hormones, carence en nutriments ou en eau, molécules signal), mais également physique (pression mécanique de facteurs externes ou de la paroi cellulaire lors de la croissance, lumière). Le développement résulte ainsi de la combinatoire de nombreux réseaux d'interactions moléculaires dont l'intégration reflète les propriétés émergentes du système. Au cours de l'évolution ou des étapes de domestication par l'homme, ce sont ces propriétés émergentes qui se sont diversifiées. Compte tenu du niveau de complexité extrême atteint dans ces systèmes, des modèles sophistiqués devront être établis en collaboration avec des équipes de mathématiciens/physiciens.

L'initiation de la floraison, le développement des organes reproducteurs, la fécondation et l'obtention d'une graine de qualité sont des événements fortement contraints par des facteurs environnementaux et par le cycle de développement de la plante. Les recherches dans ces domaines devront prendre en considération ces différents niveaux d'interactions. Un intérêt tout particulier devra être apporté à l'étude de la fertilité, des stratégies sexuelles, de la persistance des espèces et de la biodiversité.

### **Métabolomique/lipidomique et fluxomique : comprendre et maîtriser**

Les progrès technologiques dans les domaines de la génomique et de la protéomique ont permis des avancées majeures mais leur exploitation pour des études fonctionnelles est maintenant limitée par la capacité à analyser l'ensemble des petites molécules produites dans les cellules de plantes, ce qu'on appelle le métabolome, dont la complexité est immense. Un enjeu majeur pour garder notre compétitivité au niveau international est de mettre en place des plates-formes de métabolomique regroupant l'ensemble des outils et des compétences nécessaires à l'étude qualitative, quantitative et à haut débit de l'ensemble des composés organiques du métabolisme.

Ces molécules sont d'une diversité extraordinaire et d'un potentiel inépuisable pour l'innovation. Le métabolisme dit « primaire »

des plantes comprend des petites molécules solubles, par exemple les sucres simples, et des composés hydrophobes, les lipides. Du fait de l'importance des sucres et des lipides pour les applications agricoles classiques dans le secteur de la nutrition, mais aussi pour l'innovation dans les secteurs des biocarburants et des alternatives à la pétrochimie, il est essentiel de consentir un effort particulier pour acquérir le plus rapidement possible les moyens d'analyses en métabolomique et en lipidomique. Les principaux objectifs sont de comprendre le système complexe que constitue le métabolisme par des approches de biomathématiques validées par des expérimentations, et de proposer des moyens de le maîtriser en fonction des applications nouvelles dans des secteurs aussi divers que l'agronomie, la nutrition, les biotechnologies, le secteur pharmaceutique ou l'énergie. Au cours de certaines étapes de développement ou en réponse aux facteurs environnementaux, les plantes produisent aussi des métabolites dits « secondaires » qui constituent une véritable source pour les industries pharmaceutiques, la parfumerie, les industries des colorants ou des biopesticides. Une meilleure connaissance des voies du métabolisme secondaire permettra d'envisager d'agir sur celles-ci afin d'optimiser la production des métabolites, de modifier leur localisation pour faciliter leur extraction, ou de les modifier pour créer de nouvelles molécules d'intérêt.

## Évolution et Développement (Evo-Dévo)

L'Evo-Dévo repose sur l'hypothèse que les régulateurs contrôlant les grandes étapes du développement chez les espèces actuelles ont également été des acteurs clés qui ont contribué à créer de la nouveauté au cours de l'évolution. La comparaison des mécanismes développementaux entre différentes espèces permet ainsi une compréhension de la diversité des formes et aide à construire les scénarios de l'évolution. La comparaison des espèces ne permet pas seulement d'étendre les données issues d'espèces modèles à des espèces non modèles mais cette approche donne également

des informations sur le développement des espèces modèles elles-mêmes. A plus large échelle, l'analyse d'espèces clés sur l'arbre des Eucaryotes fournit un moyen de comprendre l'émergence indépendante de développements multicellulaires dans des lignages distants. Ce type d'analyse peut apporter des informations sur des principes très fondamentaux du développement.

Les dernières années ont vu l'intensification au niveau national et international de programmes de recherche visant à initier des études comparatives du développement entre des plantes modèles et des plantes cultivées ou des espèces basales (principalement mousses, gymnospermes et angiospermes basales avec des espèces clés d'autres groupes d'Eucaryotes tels que les algues rouges et brunes). Cette tendance devrait être encouragée et il paraîtrait tout à fait pertinent de définir quelques espèces de référence pour lesquelles l'établissement des outils de base serait facilité (séquence du génome, mutagenèse, transformation) par la nature intrinsèque des modèles. Plusieurs avancées récentes vont probablement avoir des répercussions majeures sur les études d'Evo-Dévo :

- les techniques de séquençage modernes facilitent la production de séquences génomiques, l'obtention de données d'expression et même de données d'interactions entre ADN et facteurs de transcription. Des plateformes de séquençage performantes sont requises associées à de fortes capacités d'analyse de ces données.

- les approches de « tilling », de « targeted nucleases » et d'extinction de gène induite par un virus (VIGS) permettent une analyse génétique et fonctionnelle des processus développementaux chez des espèces non modèles.

- les progrès dans la modélisation des systèmes de régulation offrent de nouvelles opportunités pour prédire et comparer les réseaux de régulation des gènes du développement à partir du génome de différentes espèces.

Des efforts devront être faits pour réussir ce challenge ambitieux et exploiter le grand

nombre de nouvelles séquences génomiques qui seront délivrées dans un futur proche afin de comprendre la diversité des processus développementaux ainsi que leur évolution.

## 2.2 STRUCTURE, ÉVOLUTION, EXPRESSION DES GÉNOMES ET RÉGULATIONS ÉPIGÉNÉTIQUES

### Introduction

Le séquençage de génomes entiers au cours des dernières années a permis des avancées fondamentales en génomique fonctionnelle et comparative. La génomique fonctionnelle des plantes a notamment bénéficié d'un apport sans précédent des programmes de séquençage du génome d'espèces modèles. Ces informations laissent entrevoir des perspectives importantes de progrès dans la compréhension des propriétés du vivant conférées par les mécanismes de régulation du génome, mais ont aussi révélé la prépondérance de phénomènes de redondance génique ou de génétique multifactorielle qui impliquent une approche globale future pour élucider les relations phénotype/génotype. Un fait marquant de ces dernières années en génomique végétale reste cependant la révélation de l'importance des mécanismes épigénétiques, jusqu'ici insoupçonnés, dans la stabilité des profils d'expression des gènes et dans la répression des séquences parasites. La génomique comparative tire un grand profit du développement accéléré des technologies de séquençage à haut débit. En particulier, une analyse de la variabilité naturelle présente au sein de la lignée photosynthétique est maintenant possible grâce à une étude globale et comparative des génomes. Ce type d'analyse devrait faciliter l'étude des relations génotype-phénotype et le recensement des innovations génomiques et fonctionnelles acquises au cours de l'évolution des plantes. De par la grande distribution évolutive des organismes photosynthétiques considérés, ces études macroévolutives pourront s'appliquer à l'ensemble des organismes

photosynthétiques dans le but d'étudier l'évolution et l'acquisition de mécanismes fondamentaux (par ex. les bases moléculaire de la photosynthèse) ou à un niveau plus restreint pour étudier des caractéristiques plus spécifique, propre aux angiospermes par exemple.

Les deux sections suivantes exposent les questions scientifiques majeures d'actualité dans les domaines de l'évolution et de la régulation des génomes des organismes photosynthétiques. Une attention toute particulière sera portée sur les avancées en épigénétique et les conséquences évolutives des percées technologiques nouvelles qui vont certainement nous amener à court terme à reconsidérer notre vision de l'expression du génome et de la compréhension de phénomènes biologiques complexes.

### Structure et dynamique évolutive des génomes

La disponibilité d'un nombre croissant de séquences génomiques complètes et leur étude comparative a mis en lumière une plasticité insoupçonnée des génomes, que ce soit à travers des cycles de polyploïdisation/diploïdisation successifs ou par la distribution et l'activité des éléments transposables, mettant en cause la notion même de génome modèle. Ceci ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des bases moléculaires de la biodiversité des végétaux, en particulier pour ce qui concerne les relations entre structure et fonction des génomes. Les techniques de séquençage de nouvelle génération (NGS) permettent de séquencer un génome à très faible coût. Ces développements technologiques et méthodologiques constituent une véritable révolution ouvrant la voie non seulement au séquençage d'un nombre de plus en plus important de génomes d'espèces « non modèles », mais également la mesure de la variabilité génétique intraspécifique d'espèces modèles (*Arabidopsis*, riz...). Toutefois, l'un des défis les plus importants de ce domaine de recherche sera de réussir à intégrer l'ensemble des nouvelles données acquises par

les techniques NGS pour mieux comprendre la biologie des plantes, non plus seulement à l'échelle d'un individu (i.e. la variété de référence choisie au départ par les consortiums de séquençage), mais à l'échelle des populations, voire des écosystèmes. Ceci devrait conduire à aborder la problématique de la réponse des végétaux aux changements environnementaux (anthropiques ou climatiques) à une échelle jamais atteinte jusqu'à présent et donc permettre de répondre à ces questions sociétales aujourd'hui incontournables.

De ce constat se dégagent plusieurs priorités pour le développement de ce champ de recherche. Afin de structurer les informations sur l'ensemble des organismes photosynthétiques, il faudra les placer dans un contexte évolutif, les séquences servant dans un premier temps à établir l'arbre phylogénétique et, ensuite, à classer les organismes par rapport à cet arbre. La phylogénomique, basée sur des séquences génomiques à grande échelle, représente une avancée importante par rapport aux arbres phylogénétiques classiques et permettra d'établir les relations phylogénétiques à une échelle sans précédent. Sur le plan fonctionnel, la technique de RNASeq fournira, à la même échelle que le séquençage génomique, des données quasi-exhaustives sur les transcriptomes et les métatranscriptomes, et permettra d'établir des relations entre la variabilité génomique et l'expression génique ou les modifications d'expression en fonction de changements environnementaux ou de populations. La disponibilité de séquences génomiques complètes d'organismes plus ou moins proches permettra de mieux identifier les séquences impliquées dans le contrôle de l'expression des gènes. Au niveau populationnel, les grands axes des recherches devront être : comprendre l'évolution des populations dans le temps et en fonction de l'environnement, étudier les éléments de régulation d'expression des gènes et les transcriptomes de ces populations, établir les relations structure/fonction des génomes et comprendre les mécanismes adaptatifs associés à l'évolution des phénotypes en fonction de l'environnement. Enfin, il s'agira de comprendre les bases épigénétiques de la biodiversité grâce à des approches de génomique

globale, telles que l'analyse du transcriptome ou du méthylome et ce au niveau des populations, voire des écosystèmes.

## Régulations géniques et épigénétiques

La recherche française a contribué de manière conséquente à la compréhension des mécanismes de régulation génique des plantes et du rôle croissant tenu par les mécanismes épigénétiques dans l'établissement de patrons stables d'expression génique sans modification du patrimoine génétique. En particulier, des études pionnières ont permis l'identification de nouveaux acteurs de régulations épigénétiques, tels les petits ARN non-codants, les modulateurs chromatiniens voire même le protéasome, ce qui illustre la diversité des mécanismes mis en jeu. Ces mécanismes épigénétiques jouent un rôle central dans la capacité des plantes à s'adapter à leur environnement et leur étude demeure un domaine de recherche extrêmement dynamique et compétitif. L'élucidation des mécanismes de régulations épigénétiques est étroitement dépendante de la compréhension des principes fondamentaux de régulation génique. Ce champ disciplinaire vaste comprend toutes les étapes du continuum de la régulation génique, du contrôle de la dynamique chromatinienne et de la coordination des trois génomes (nucléaire, mitochondrial et chloroplastique) présents dans la cellule végétale à celui de l'homéostasie des ARN codants et non-codants et des protéines néo-synthétisées.

Quatre priorités se dégagent dans ce champ de recherche :

- une compréhension des mécanismes moléculaires des régulations géniques et épigénétiques des organismes photosynthétiques doit rester un objectif prioritaire. Cette connaissance fondamentale reste indispensable pour comprendre et manipuler la plasticité remarquable de ces organismes en réponse à des stimuli développementaux et environnementaux.

- les potentiels des approches de génétique directe et inverse classiques restent immenses mais à l'évidence tous les champs d'étude de

régulations géniques et épigénétiques deviennent dépendants d'analyses à haut débit. Ces analyses sont incontournables pour dresser une carte précise des composantes transcriptionnelles, post-transcriptionnelles et post-traductionnelles de la régulation du génome et de l'épigénome des végétaux. L'intégration de ces données dans des systèmes prédictifs à l'échelle cellulaire et de l'organisme dans son intégralité constitue un défi majeur et prioritaire pour la recherche en biologie végétale.

– la tendance actuelle de déchiffrer les régulations géniques et épigénétiques à l'échelle cellulaire doit être confortée. Cette stratégie nécessite le développement d'outils technologiques particuliers chez les végétaux et reste nécessaire pour mieux comprendre leurs réponses à des stimuli développementaux et environnementaux.

– le maintien d'une diversité des modèles d'étude en biologie végétale est essentiel pour la découverte de nouvelles fonctions régulatrices de l'expression du génome mais aussi pour appréhender l'ensemble des innovations fonctionnelles liées à ces processus. En effet, bien que les acteurs protéiques impliqués dans les mécanismes génétiques et épigénétiques semblent être fortement conservés au sein du règne végétal, il est probable que l'impact de ces voies de régulation sur la physiologie et le développement des végétaux soit spécifique à chaque espèce (par ex. adaptation de la machinerie épigénétique impliquée dans la répression des régions répétées du génome aux architectures génomiques très différentes des génomes d'*Arabidopsis* et du riz).

## Conclusions

Prises dans leur ensemble, ces observations soutiennent pleinement l'idée que les représentants des lignées eucaryotiques photosynthétiques constituent des modèles originaux en génomique comparative et fonctionnelle, pour certains très peu explorés. Il apparaît évident que la gestion et la mise en relation de l'ensemble des données -omiques nécessiteront un accroissement considérable

de la capacité de stockage et de puissance de calcul dans des centres appelés à gérer les informations et une mise à disposition des outils et des résultats des analyses accessibles à tous. Ces nouveaux outils impliquent de prévoir des formations pour les chercheurs amenés à utiliser ces données. Les concepts élaborés auront vocation à irriguer tous les champs disciplinaires de la biologie végétale moderne, allant de l'intégration du métabolisme dans la physiologie de la plante aux mécanismes qui président à son développement et à sa réponse adaptative à l'environnement.

## 2.3 INTERACTIONS ENTRE LES VÉGÉTAUX ET LEURS ENVIRONNEMENTS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES

### Introduction

Les végétaux sont confrontés à de très nombreux stress biotiques et abiotiques lors de leur colonisation d'environnements variés et contraignants. Leur capacité à adapter leur mode de vie photosynthétique à des milieux variés, changeants et souvent extrêmes résulte de leur aptitude à mettre en place des mécanismes d'ajustement et de défense, généraux ou spécifiques, régulés finement au niveau spatio-temporel. La diversité de ces mécanismes est reflétée par l'existence chez les plantes terrestres d'un très grand nombre de réseaux de régulation (plus de 3 000 facteurs de transcription dans un génome de plante), qui sont pour la plupart impliqués dans la réponse de l'organisme à ces contraintes environnementales. Ces réseaux de régulation complexes et inter-connectés contrôlent la mise en place de phénotypes adaptés à chacune de ces contraintes.

Les contraintes biotiques des plantes et des autres organismes photosynthétiques sont multiples et complexes, mettant en jeu des partenaires extrêmement variés, capables d'établir

des interactions favorables (symbiotes, mutualistes), ou délétères (pathogènes, parasites, compétiteurs). En particulier, les végétaux cultivés sont particulièrement attaqués par un très grand nombre de bio-agresseurs tels que des virus, des bactéries, des champignons, des nématodes et des insectes. Les dommages provoqués par ces bio-agresseurs sur les productions agricoles ont un impact économique et sociétal majeur, tout en posant des problèmes sanitaires. Il est donc absolument nécessaire de mettre en place des méthodes de lutte durables et raisonnées pour maintenir, sinon développer, le niveau actuel de production agricole. Ces bio-agressions encore peu explorées en milieu aquatique n'en demeurent pas moins un enjeu pour le développement de l'exploitation durable de la biomasse végétale aquatique en culture.

Cette capacité adaptative est fortement mise à contribution par les changements climatiques en cours. Ces changements vont en effet conduire à de fortes variations de la température et de la disponibilité en eau qui risquent d'affecter la stabilité des écosystèmes naturels et cultivés et de favoriser l'émergence de nouveaux agents pathogènes. De plus, l'évolution des politiques publiques conduit à préconiser une réduction de l'utilisation d'engrais et de pesticides en agriculture, ce qui, si ces changements ne sont pas compensés par de nouvelles pratiques culturales, induira certainement une diminution importante de la production agricole.

### **Interactions entre les plantes et leurs microorganismes et bio-agresseurs associés**

Du côté de la plante, le développement de systèmes modèles tels qu'*Arabidopsis thaliana*, *Medicago truncatula* et le riz, ainsi que les progrès des recherches menées sur des plantes cultivées comme le blé ou le maïs, ont conduit à une explosion de nos connaissances sur les bases génétiques et moléculaires des interactions entre les plantes et leurs microorganismes associés, mutualistes ou pathogènes. Ils ont aussi permis l'identification

de nombreux gènes végétaux impliqués dans les mécanismes de résistance et de défense, dont ceux codant des récepteurs de signaux microbiens. La caractérisation de ces récepteurs a été une question centrale de l'étude des interactions plantes micro-organismes au cours de cette dernière décennie. En parallèle, l'étude des réseaux de gènes contrôlant l'ensemble des réponses de la plante aux différentes composantes de son environnement biotique a permis des avancées importantes dans notre compréhension des processus biologiques et des mécanismes mis en jeu pour interpréter la nature du ou des signaux perçus et tenter d'y apporter une réponse adaptée (par exemple l'induction des mécanismes de résistance et de défense ou l'activation des programmes génétiques permettant l'établissement d'une interaction symbiotique). Cette connaissance des gènes et des fonctions a largement « nourri » les programmes d'amélioration des plantes cultivées visant à optimiser leur résistance aux agents pathogènes, ou leur capacité symbiotique. En dépit des progrès importants réalisés ces dernières années, le fonctionnement de ces réseaux de régulation complexes reste pour une large part mal connu. Pour les autres organismes photosynthétiques, les efforts de recherche ont été beaucoup plus limités, mais l'accès aux données génomiques chez ces organismes révèle une grande complexité et une évolution ancienne de systèmes d'immunité innée basés sur de potentiels récepteurs de signaux microbiens. La domestication de nouveaux organismes photosynthétiques (microalgues) nécessitera probablement d'intensifier ces travaux

Du côté des microorganismes, l'accélération des programmes de séquençage de génomes microbiens, associés au développement d'outils puissants d'analyse fonctionnelle, a permis un accroissement rapide des connaissances sur les programmes génétiques et les mécanismes mis en jeu lors de l'établissement des interactions avec le partenaire végétal, tant au niveau fonctionnel qu'évolutif. Ces approches ont ainsi permis l'identification d'un grand nombre de fonctions clés impliquées dans ces interactions. En particulier, elles ont permis de définir les répertoires de protéines produites,

injectées ou transloquées par ces micro-organismes dans leurs plantes hôtes. Une proportion importante de ces protéines microbiennes présentes dans les tissus, correspond à des effecteurs qui ont la particularité de reprogrammer les grandes fonctions métaboliques et cellulaires de la plante, en particulier leurs systèmes de défense contre les bio-agresseurs. De plus, ces études ont permis d'établir une image détaillée, bien qu'incomplète, des mécanismes d'entrée et de colonisation des plantes par ces microorganismes.

La vision offerte maintenant par ces interactions est celle d'un dialogue où chacun des partenaires met en jeu des arsenaux élaborés et en constante évolution. Il est à présent nécessaire d'intégrer les connaissances acquises dans des modèles fonctionnels. Un autre défi est de développer les approches couplant évolution et analyse fonctionnelle, afin de mieux comprendre les mécanismes mis en place par les microorganismes et leurs hôtes lors de leur co-évolution. Ces connaissances fondamentales seront particulièrement utiles pour la sélection de cultivars présentant des résistances durables.

### **Plasticité et adaptation des plantes à des conditions environnementales changeantes**

La croissance des plantes terrestres dépend de paramètres environnementaux tels que les variables physico-chimiques de composition du sol et de l'atmosphère (température, intensité et qualité de la lumière, disponibilités en eau et en éléments minéraux nutritifs). Des variations importantes de ces paramètres sont attendues dans le cadre des grands changements climatiques et géophysiques en cours (réchauffement, accroissement du CO<sub>2</sub>, modification des régimes pluviaux, érosion des sols). Ces variations devraient engendrer des modifications importantes des écosystèmes végétaux, conséquences dont il est aujourd'hui difficile de mesurer avec rigueur l'importance, mais qu'il est possible d'évaluer à travers des modèles intégratifs.

Une des fonctions essentielles des plantes vasculaires dans le cadre de leur adaptation à un environnement abiotique, est la récupération de l'eau et des éléments minéraux du sol à l'aide de leur système racinaire. Un défi majeur dans ce domaine est de mieux comprendre comment les racines perçoivent et intègrent des signaux multiples et souvent contrastés rencontrés dans le sol afin d'optimiser leur capacité d'exploration et d'acquisition de ces ressources nutritionnelles. La compréhension des mécanismes impliqués dans ces réponses adaptatives a largement progressé grâce à des études combinant des approches génétiques, physiologiques et génomiques sur des plantes modèles. L'intégration de l'ensemble de ces connaissances dans des modèles écophysiologiques a permis d'éclairer la hiérarchie et la structuration des facteurs impliqués dans la réponse des plantes aux contraintes abiotiques. Ainsi, il a été montré que plusieurs types de signaux (hormones, formes réactives de l'oxygène), et de protéines impliquées dans les réseaux de régulation (facteurs de transcription, enzymes des voies de signalisation) sont des acteurs communs des voies de signalisation impliquées dans les réponses aux contraintes abiotiques et les réponses développementales des plantes.

### **Approches intégrées pour l'étude des effets des contraintes biotiques et abiotiques chez les plantes**

Historiquement, la réponse des plantes aux stress biotiques et abiotiques a été étudiée dans le cadre d'une seule contrainte appliquée le plus souvent en conditions contrôlées. Le développement d'outils de phénotypage à haut débit en biologie offre la possibilité d'étudier et d'intégrer les réponses des plantes à des contraintes multiples. L'extraordinaire capacité de programmation de l'expression des gènes par les plantes est un élément clé de leur réponse à ces contraintes. L'analyse des modifications des profils transcriptionnels des plantes en réponse à des contraintes biotiques et abiotiques très diverses, a fait émerger un concept nouveau suggérant une réponse

initiale à ces contraintes reposant sur un noyau de régulateurs communs et d'une réponse plus tardive dépendant de régulateurs spécifiques de chacune des contraintes. Le développement d'approches quantitatives en biochimie et métabolomique, en particulier au niveau cellulaire, devrait permettre également de mieux appréhender la complexité de la réponse des plantes à ces contraintes. Le premier défi majeur dans ce domaine de recherche est d'acquiescer une vision intégrée des interactions entre les voies de signalisation impliquées dans les réponses aux contraintes biotiques et abiotiques et celles contrôlant la croissance et le métabolisme. Un second défi est de traduire les connaissances fondamentales acquises sur les plantes modèles pour l'amélioration de traits d'intérêt agronomique chez les plantes cultivées.

### **Adaptation des microorganismes et des bio-agresseurs à leurs plantes hôtes**

Les interactions biotiques des plantes correspondent à un ensemble complexe de réponses adaptatives résultant aussi bien de la variabilité des plantes hôtes que de la cohorte de microorganismes et bio-agresseurs associés, et des modalités de ces interactions multipartenaires. Cette complexité nécessite des approches intégrant aussi bien les niveaux fonctionnel et évolutif, qu'écologique. En particulier, la compréhension des forces évolutives qui structurent les interactions entre ces multiples partenaires est particulièrement importante pour prédire le comportement des plantes cultivées dans différents écosystèmes. L'impact de l'évolution attendue du climat et des pratiques agricoles sur les microorganismes associés aux plantes est aussi un défi majeur dans ce domaine de recherche.

Les études à mener nécessitent l'identification exhaustive des partenaires de l'interaction, le développement de systèmes expérimentaux reflétant cette complexité et leur analyse à différents niveaux (du gène au champ). En particulier, la combinaison d'ap-

proches d'écologie moléculaire à partir d'analyses génomiques et métagénomiques permettra d'avoir un point de vue exhaustif sur les populations de plantes et leurs microorganismes associés. La mise en œuvre d'approches de génomique fonctionnelle au niveau d'écosystèmes modèles permettra de mieux comprendre de rôle des différents mécanismes impliqués dans ces interactions biotiques et de découvrir de nouvelles fonctions importantes à cette échelle.

### **Interaction des réponses aux contraintes environnementales avec les programmes de développement des plantes**

L'étude des voies majeures de signalisation qui coordonnent le développement des plantes a permis d'obtenir des connaissances essentielles sur ces processus biologiques, en particulier dans le domaine de la signalisation hormonale. Par contre, le rôle dans le développement des plantes, des signaux, des métabolites et des protéines impliquées dans les réponses aux contraintes biotiques et abiotiques, est encore mal connu. La confrontation de ces deux champs disciplinaires (réponses aux contraintes et développement) est nécessaire afin de mieux appréhender les interactions entre ces deux systèmes intégrés de fonctionnement de la plante.

## **3 – QUESTIONS, OUTILS ET RESSOURCES**

Pour répondre aux objectifs des trois grands domaines de recherche définis ci-dessus, il sera nécessaire de lever des verrous conceptuels ou techniques et de mettre en œuvre différents types d'outils et de ressources dont beaucoup ne sont pas spécifiques aux plantes mais peuvent être partagés avec la plupart des modèles étudiés en sciences du vivant.

– *explorer la diversité structurale des génomes et la variabilité de leur expression*

Un enjeu majeur est d'augmenter le nombre des plates-formes de séquençage à haut débit et d'en faciliter l'accès, tout en améliorant les capacités d'analyse des grands jeux de données générées par ces nouvelles méthodologies.

– *définir les règles d'interactions au niveau moléculaire*

Les capacités d'analyse à grande échelle devront être développées pour caractériser les interactions protéines/protéines ou protéines/ADN ainsi que les modifications post-traductionnelles des protéines, et les replacer dans le contexte hiérarchique et temporel qui a conduit à leur apparition.

– *définir et quantifier la distribution spatiale des molécules dans la plante et évaluer leur dynamique*

Les processus de développement et d'adaptation à l'environnement se traduisent par une distribution différentielle de molécules dans le temps et dans l'espace, et un investissement majeur est nécessaire pour quantifier ces distributions spécifiques. Une bonne connaissance de toutes les molécules, des enzymes aux métabolites, qui composent les cellules végétales est requise, incluant leur distribution spatio-temporelle à l'intérieur de la cellule ou dans la plante.

Cette information doit être obtenue en intégrant les approches de protéomique et de métabolomique et par des dosages biochimiques quantitatifs, atteignant dans l'idéal une résolution à l'échelle de la cellule unique. Cette échelle peut être atteinte notamment par les méthodes de micro-imagerie chimique, mobilisant tous les techniques de la spectrométrie de masse par désorption de surface ou les techniques de fluorescence et d'absorption des rayons X sur les rayonnements Synchrotron.

L'analyse du métabolome se développe actuellement très rapidement dans toutes les études de biologie intégrative, qui visent à appréhender de manière globale le métabolisme et à intégrer cette analyse dans les projets

de modélisation de la physiologie des plantes. Les approches de métabolomique ciblée (identification et quantification de familles particulières de métabolites) ou globale (identification et quantification de l'ensemble des métabolites) et de fluxomique (analyse des vitesses réelles de conversion biochimique – flux métaboliques – dans le système vivant) sont toutes requises pour améliorer la compréhension des réseaux métaboliques.

Les techniques d'imagerie et de spectroscopie *in vivo* seront également essentielles pour localiser et quantifier les différents composants moléculaires dans les cellules. De grandes collections de plantes transgéniques exprimant des protéines étiquetées par exemple par la « Green Fluorescent Protein » (GFP) peuvent être développées dans une première étape pour localiser les protéines individuelles et suivre leur dynamique (incluant les modifications post-traductionnelles). Cependant, de nouvelles méthodes d'imageries sophistiquées et les outils associés (nouveaux fluorochromes par exemple) seront nécessaires pour localiser et quantifier d'autres molécules comme les sucres, les lipides ou les hormones. Les nouvelles méthodes d'imagerie à haute résolution en temps réel fondées sur la microscopie STED ou PALM méritent dans ce cadre un intérêt particulier.

– *répondre au besoin d'infrastructures adaptées*

La réponse au besoin d'infrastructures performantes et adaptées (incluant séquençage à haut débit, protéomique, métabolomique, imagerie, phénotypage, serveurs informatiques et centres de calcul) passera inévitablement par la mise en place de plates-formes qui devront être aisément accessibles aux communautés scientifiques (géographie et coût).

– *développer des outils de modélisation*

Les données impliquant l'interaction de centaines de composants (à l'échelle des molécules, des cellules, ou des plantes) dans l'espace et dans le temps seront impossibles à appréhender sans les bases de données appropriées, qui seront capables de connecter diffé-

rents types de données et d'accélérer ainsi le développement de modèles quantitatifs.

Des modèles sous la forme de cellules ou tissus virtuels sont actuellement développés, mais la représentation spatiale complexe demeure un défi. La modélisation multi-échelle nécessitera de nouveaux cadres théoriques pour « remplir » les structures spatiales avec les données de biochimie, de physique et de biologie cellulaire. Des développements théoriques et techniques seront ensuite nécessaires pour appliquer l'approche systémique à une large échelle, d'abord pour construire les modèles, puis pour automatiser l'acquisition

des données, leur analyse et le paramétrage des modèles.

Des approches comme la modélisation ou le biomimétisme requièrent un effort de collaboration entre biophysiciens, biochimistes, mathématiciens et informaticiens qui doivent être intégrés dans des équipes pluridisciplinaires. Une telle intégration, réalisée au niveau de scientifiques confirmés mutualisant leurs efforts, mais aussi à celui de la formation initiale (étudiants) et continue, permettra de répondre à l'objectif de placer la recherche en biologie végétale dans une dimension pluridisciplinaire.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

AgroParisTech	Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement
CEAh	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CIRADh	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
ENSh	École Normale Supérieure
GFPh	Green Fluorescent Protein
IATOSH	Ingénieurs, administratifs, techniciens, ouvriers et personnel de service
ITh	Ingénieurs et techniciens,
INRAh	Institut National de la Recherche Agronomique
IRDh	Institut de Recherche pour le Développement

Montpellier SupAgroh Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques

### ANNEXE 2 : DOCUMENTS À CONSULTER

«EU 2020 vision for Plant Science», élaboré à la suite d'un colloque organisé en 2008 par le *Biotechnology and Biological Sciences Research Council* (Royaume Uni) et la *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (Allemagne) (<http://www.uni-tuebingen.de/plantphys/AFGN/EU2020VisionPlantScience.pdf>).

«National Plant genome Initiative : 2009-2013» établi en 2008 aux États-Unis par le *National Science and Technology Council Committee of Science* et l'*Interagency working group on plant genomes* ([http://www.nsf.gov/bio/pubs/reports/npgi\\_five\\_year\\_plan\\_2009\\_2013.pdf](http://www.nsf.gov/bio/pubs/reports/npgi_five_year_plan_2009_2013.pdf))

«New horizons in plant sciences for human health and the environment» publié en 2009 par les *National Academies* américaines (*the National Academy of Sciences, the National Academy of Engineering, the Institute of Medicine, and the*

*National Research Council*) ([http://www.whyybiotech.com/resources/tps/plant\\_sciences\\_final.pdf](http://www.whyybiotech.com/resources/tps/plant_sciences_final.pdf))

« Rapport de synthèse sur les technologies du futur » issu d'un projet mené par l'Unité Prospective INRA et visant à identifier des technologies émergentes pertinentes pour la recherche agronomique et susceptibles de répondre aux enjeux de l'agriculture des décennies à venir ([http://www.paris.inra.fr/prospective/projets/technologies\\_du\\_futur](http://www.paris.inra.fr/prospective/projets/technologies_du_futur))

« An International Model for the Future of Plant Science » élaboré à la suite du colloque « International Plant Science Vision Workshop » organisé aux États-Unis en 2009 par le *Biotechnology and Biological Science Research Council* (Royaume Uni), la *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (Allemagne) et la *National Science Foundation* (États-Unis) (<http://www.uni-tuebingen.de/plantphys/AFGN/InternatModelFuturePlantSci.pdf>)

# BIODIVERSITÉ, ÉVOLUTION ET ADAPTATIONS BIOLOGIQUES : DES MACROMOLÉCULES AUX COMMUNAUTÉS

*Président*  
Pierre CAPY

*Membres de la section*  
Anick ABOURACHID  
Karine ALAIN  
Gérard ARNOLD  
Stéphane BLANC  
François BONHOMME  
Vincent BRETAGNOLLE  
Chenuil CHENUIL-MAUREL  
Julien CLAUDE  
Chantal DEBAIN  
Laurence DESPRES  
Philippe GRANDCOLAS  
Laurent LAPCHIN  
Dominique MOUCHIROUD  
Stéphane PEIGNE  
Jean-Sébastien PIERRE  
François RENAUD  
Jean-Louis SALAGER  
Patrick SCHEVIN  
Christophe THEBAUD  
Myriam VALERO

La section 29 intitulée « Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des Macromolécules aux communautés » a un périmètre d'action très vaste relevant essentiellement des sciences de l'Écologie et de l'Évolution. Ce vaste champ thématique reflète notre conviction de la nécessité d'approches intégrant différents niveaux d'organisation de la biodiversité et faisant interagir des questions sur les mécanismes proximaux et les causes ultimes des traits d'organismes et leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. Ces aller-retour entre patterns et processus évolutifs fournissent la grille de lecture de la biodiversité actuelle ou passée et nécessitent d'impliquer de nombreuses disciplines scientifiques (génétique, écologie, physiologie, paléontologie, phylogénie,...).

# 1 – BILAN DES UNITÉS DE LA 29

## 1.1 BILAN

Au cours de ce dernier quadriennal les chercheurs de la section 29 ont vu leur niveau de publications nettement augmenter dans les champs disciplinaires de l'Écologie et de l'Évolution, mais également dans les revues plus généralistes (Nature, Sciences, PNAS, Plos...). Ceci s'est aussi traduit par de nombreuses invitations et participations à des colloques internationaux de leur discipline. Un certain nombre de jeunes chercheurs se sont très bien positionnés dans les bourses ERC jeunes chercheurs afin de soutenir leurs thématiques novatrices.

Outre leurs activités de recherche fondamentale les chercheurs de la 29 se sont aussi beaucoup investis dans la formation universitaire en tant qu'enseignant, voire même responsable de formation. Ils ont également participé à de nombreuses actions de vulgarisation, notamment en 2009 au cours de l'année Darwin pour la diffusion des connaissances fondamentales liées à l'évolution. Cette action s'est poursuivie en 2010 par leur investissement dans l'année de la Biodiversité (expositions, films, livres, débats, conférences)

## 1.2 QUELLES SONT LES UNITÉS DE LA 29 ?

Quarante structures de recherche ou de service ont pour rattachement principal la section 29. L'essentiel est composé d'UMR (30) mais on compte aussi 3 UMS, 2 UPR, 2 USR, 1 FRE, 1 URA (Inserm) et 1 UPS. Les unités de la section 29 sont géographiquement réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain et sont présentes en outre-mer (Nouméa). Trois zones géographiques regroupent néanmoins à

peu près la moitié des unités de recherche de la section : l'Île de France et les délégations Languedoc-Roussillon et Centre-Poitou-Charentes. On retrouve un schéma un peu différent concernant la répartition des personnels de la section 29, dont la moitié appartient à des unités d'Île-de-France et du Languedoc-Roussillon. Environ 10% des personnels de la section 29 sont affectés dans des unités qui dépendent d'autres instituts du CNRS, en particulier l'INSU, l'INSB et l'IN2P3.

## 1.3 RELATIONS AVEC D'AUTRES INSTITUTS DE RECHERCHE

De par la nature interdisciplinaire des thématiques de la 29, les partenariats sont nombreux avec d'autres instituts du CNRS et notamment l'INSB, l'INSU et l'INSHS. Les chercheurs de la 29 sont aussi souvent associés dans leurs équipes ou au travers de programmes de recherches (ANR, FRB, Biodiversa...) à des chercheurs des Universités et d'autres organismes tels l'INRA, l'IRD, le CIRAD, le CEMAGREF et l'IFREMER.

## 1.4 RECRUTEMENTS DE LA 29

**Chercheurs.** De 2005 à 2009, la section 29 a recruté 40 chercheurs, 13 CR1 et 27 CR2 qui ont été affectés dans plus de 25 laboratoires (UMR ou UPR) relevant de la section. Les recherches menées par ces nouveaux entrants couvrent l'ensemble des domaines de la section. Dans le détail, notons que, parmi ces candidats, une moitié mène des recherches dans trois principaux domaines : (i) génétique et la génomique des populations, (ii) origine, structure, dynamique et gestion de la biodiversité et (iii) mécanismes et processus de l'adaptation et de l'évolution : évolution des génomes, évolution du développement, expression du génome et plasticité phénotypique. La seconde moitié des recrutés sur la

période 2005-2009 se répartit à peu près équitablement dans les autres principaux domaines couverts par la section : (i) Systématique évolutive, phylogénies moléculaires et morphologiques, biogéographie, paléontologie ; (ii) Écologie et biologie évolutives, écologie du comportement, écophysio­logie, traits d'histoire de vie ; (iii) Interactions durables, relations hôtes-parasites et hôtes-symbiontes ; (iv) Écologie microbienne et microbiologie évolutive.

### **Ingénieurs, techniciens et personnels administratifs (ITA)**

Le faible recrutement en ITA est un problème récurrent au CNRS et n'a fait que de s'accroître au cours des dernières années. Ainsi pour les années 2007-2009 le recrutement, par concours externe, d'ITA n'a été que de 31 agents permanents dans les laboratoires de la section 29 dans EDD puis INEE. Comme dans beaucoup d'autres disciplines, on assiste à une précarisation de ces postes par le recrutement de nombreux CDD sur des contrats ANR ou des contrats européens.

Année	NB IR	NB IE	NB AI	NB T	NB AJT	TOTAL
2007	3	4	2	2	1	12
2008	1	2	1	4	0	8
2009	2	3	3	1	2	11

Répartition des recrutements en ITA (INEE) sur concours externes dans les laboratoires de la section 29

## **2 – LES ENJEUX SCIENTIFIQUES**

L'enjeu scientifique de la section 29 réside dans la nécessité de considérer une diversité

de modèles biologiques, d'environnements, d'échelles spatio-temporelles et de niveaux d'organisation du vivant pour aborder l'étude de la biodiversité sous toutes ses facettes. Son atout majeur est de s'appuyer sur la biologie et l'écologie évolutive, domaines de la biologie pour lesquels des théories et modèles prédictifs existent. La démarche est la même qu'en physique où l'expérimentation valide la théorie, et l'alimente en retour. L'évolution est le socle des thématiques abordées par la section 29. Bien que tout biologiste se réclame volontiers de l'évolution, l'évolution ne se réduit pas à l'étude de l'adaptation, il existe aussi une part de hasard, de contrainte et de conflit comme le montrent certains des exemples mentionnés ci-dessous, qui démontrent le dialogue permanent entre observations, expérimentations et modélisations ainsi que la nécessité de l'intégration de connaissances, de concepts et de données de nature très différente.

### **2.1 MÉCANISMES DE L'ÉVOLUTION : DU GÉNOME AU PHÉNOTYPE**

**Écologie des génomes.** Les caractéristiques structurales et fonctionnelles des gènes support de l'information génétique (structure) sont en partie conditionnées par leur environnement génomique (niche génomique). D'une part, les mécanismes moléculaires (recombinaison, mutation, transcription, remaniement chromosomique) impactent fortement la structure de l'information génétique ; d'autre part, la structure même de l'ADN (conformation, positionnement dans le noyau, etc.) conditionne les mécanismes moléculaires. La lecture même de la séquence du gène (épigénétique) peut dépendre de l'environnement de ce dernier. La notion de niche génomique conduit à considérer les éléments génomiques, tels que les éléments transposables (ETs), comme des communautés dont les interactions (voir ci-dessous) peuvent être vues au travers des

modèles empruntés à l'écologie des communautés (compétition, prédation/parasitisme, mutualisme, assemblage d'espèces...).

**Dynamique des génomes.** La structure des génomes (taille, composition en base, en ETs, nombre de gènes) évolue par le biais des mécanismes moléculaires (duplication génomique, duplication génique, réarrangement, transferts horizontaux, mobilisation des ETs...). Ces mécanismes peuvent survenir à des échelles de temps très courtes comme dans le cas des polymorphismes de taille. Ils peuvent être en partie la réponse à des stress environnementaux (exemple, mobilisation d'ET, etc.) ou le résultat de mécanismes adaptatifs (domestication ; résistance aux insecticides...). Le développement des nouvelles techniques de séquençage va permettre d'étudier les mécanismes liés à la dynamique des génomes à l'échelle populationnelle afin notamment de mettre en relation le polymorphisme du nombre de copies d'un gène donné avec certaines pathologies ou la variabilité environnementale (alimentation, milieu, etc.). À une échelle plus grande, l'obtention d'un grand nombre de génomes complets à l'échelle des eucaryotes va permettre d'étudier l'évolution des répertoires et des réseaux géniques en relation avec les caractéristiques physiologiques, pathogéniques et écologiques des organismes. Ceci permettra d'identifier et de comprendre les mécanismes moléculaires à l'origine de nouveautés géniques.

**Génomique fonctionnelle.** Le résultat le plus surprenant de ces 10 dernières années est la découverte que le *fonctionnement* d'un organisme, qui se traduit par l'expression d'un phénotype, ne dépend pas seulement de l'expression d'un seul gène, ou de quelques gènes mais également des interactions entre ces derniers (réseau génique), de l'action des ARN interférents ou des modifications épigénétiques. De même, les mécanismes d'épissage alternatif et de régulation à grande distance sont à l'origine de différences phénotypiques.

L'expression du phénotype individuel d'un organisme résulte de l'expression de son propre génotype mais également de l'expression du génotype des multiples organismes

avec lesquels il interagit. Tout phénotype est donc un phénotype étendu. Cette notion, particulièrement évidente dans le cas des interactions hôtes-parasites, est aujourd'hui étendue à l'ensemble de la microflore hébergée par les organismes. Qu'il s'agisse de *consortia* bactériens extrêmement complexes comme chez les vertébrés (*e.g.* flore intestinale) ou d'associations impliquant beaucoup moins de partenaires (*e.g.* flore symbiotique des invertébrés), de nombreux exemples attestent aujourd'hui de l'influence de ces partenaires sur l'expression de multiples traits de leurs hôtes (*e.g.* capacités métaboliques, développement du système immunitaire, protection contre des agents infectieux...). Les nouvelles techniques de séquençage permettent de décrire en termes spécifiques ou fonctionnels ces microflores et ainsi de décrire plus finement à la fois la structure de ces communautés, mais également leur rôle potentiel dans le phénotype individuel. Par ailleurs, les analyses de transcriptomique comparative entre individus qui diffèrent par leur statut d'infection permettent d'étudier l'impact de ces partenaires sur l'expression des gènes, et donc du phénotype, des hôtes.

**Épigénétique.** Il s'avère que le fonctionnement d'un gène peut ne pas être dicté par sa seule séquence d'ADN mais résulter de mécanismes mettant en cause la lecture de la séquence : *l'épigénétique*. Ainsi depuis longtemps, des travaux ont montré que la méthylation des cytosines est un des mécanismes de défense de l'organisme contre la propagation des éléments transposables et des virus. Au niveau populationnel, ces modifications épigénétiques vont créer de la variabilité pour le caractère étudié et donc faire l'objet de la sélection. Dans ce cadre, les techniques « haut débit » vont permettre des approches d'épigénomique populationnelle afin d'aborder l'impact de cette variabilité et donc du potentiel évolutif de ces caractères épigénétiques. Le plus surprenant est que ces modifications que l'on croyait transitoires, semblent pouvoir donner naissance à des épiallèles non seulement transmissibles d'une génération à la suivante mais également sélectionnables. Quels sont les mécanismes en cause : au niveau des cellules soma-

tiques et/ou germinales? Ces mécanismes se mettent-ils en place au cours du développement? Durant quelle phase? Quels sont les effets de l'environnement? Toutes ces questions doivent permettre d'intégrer ces phénomènes dans les contextes écologique et évolutif.

L'épigénétique remet en cause les modèles classiques de génétique quantitative «relation génotype-phénotype» et le dogme selon lequel le gène est l'unité de sélection. Il faut repenser plutôt en termes d'environnement du gène (niche génomique) qui va conditionner la manière dont le gène va être lu et le phénotype qui va en résulter. La question qui va se poser alors sera de savoir si l'unité de sélection est bien le gène ou la façon de le lire dans un environnement donné.

**Eco-Evo-Devo.** Dans un contexte où le rôle de l'épigénétique et l'épistasie rendent l'équation un gène/une protéine/un trait obsolète dans de nombreux cas, il est nécessaire non seulement de comprendre la physiologie développementale à l'origine de la construction des traits, mais aussi de revoir la manière dont les traits varient et évoluent -ou pas-. La notion de robustesse s'est, entre autres, progressivement imposée. On sait par exemple que certains motifs cellulaires ou phénotypiques peuvent être invariants dans des clades donnés alors que les mécanismes de développement peuvent varier entre espèces, et même au sein d'une espèce en relation avec les variations des conditions environnementales et génétiques. Les concepts de canalisation et d'assimilation génétique ont ressuscité les travaux de Waddington et ouvert un certain nombre de discussions sur l'évolution des traits. D'autre part, dans nos disciplines, la plasticité phénotypique adaptative a peu à peu intégré la dimension développementale et permet de mieux comprendre comment les organismes peuvent se maintenir dans des environnements variables. Par exemple, l'existence et l'évolution de «switches» entre des phénotypes alternatifs comme réponse à différentes contraintes environnementales au long du développement ou des cycles de vie montrent non seulement la complexité des relations

entre génome et phénotype, mais également la nécessité d'une meilleure compréhension des mécanismes de contrôle instaurés le long du développement pour comprendre l'évolution des organismes.

La lecture des phénotypes complexes et leur quantification s'est démocratisée ces dernières années. En ce qui concerne la morphologie, les données tridimensionnelles deviennent accessibles et analysables *via* l'augmentation des capacités informatiques et *via* la multiplication des plateformes techniques permettant leur accès. Les données longitudinales complexes deviennent peu à peu accessibles à travers des appareillages *in vivo* ou *in natura*. Par ailleurs, l'analyse des phénotypes complexes s'est appropriée un certain nombre de concepts pour mieux comprendre l'évolution des traits (intégration développementale entre les traits; contraintes évolutives, paysage adaptatif et matrice de variance covariance génétique entre les traits, disparité développementale...) et d'outils mathématiques pour les analyser de manière expérimentale ou dans la nature (e.g., modèles mixtes en génétique quantitative, permettant de s'affranchir de plan de croisement classique).

## 2.2 INTERACTIONS DURABLES, CO-ÉVOLUTION : INTERACTIONS COMME SOURCE D'ADAPTATION ET D'ÉVOLUTION

Les interactions (au sens d'interactions durables) font partie intégrante des enjeux de la section et leur analyse de leur compréhension mécanistique jusqu'à leur modélisation au plan global, nécessitent des recherches pluridisciplinaires alliant écologie, sciences médicales, épidémiologie, physiologie, modélisation, évolution...

**Adaptation et évolution.** Aucune molécule, organisme, population ou espèce n'échappent à l'interaction qui est source d'adaptation et d'évolution pour chacun des

partenaires impliqués. En effet, l'analyse des interactions nous renseigne sur les mécanismes de l'interaction entre les molécules, sur les normes de réaction, la plasticité phénotypique des organismes, sur l'évolution des relations entre les populations, leur coévolution et les possibles spéciations suite à des événements de transferts latéraux et sur la compréhension du fonctionnement et de la dynamique des systèmes écologiques complexes. Dans tous les cas, la connaissance de la diversité des interactions participe à l'appréhension globale de la biodiversité car la vie dans les écosystèmes existe grâce aux interactions et non simplement par la diversité de ces êtres vivants eux-mêmes.

**Mutualisme/parasitisme.** Deux grands types d'interactions existent : les interactions de type mutualisme (symbiose), appelant à la notion de coopération et de bénéfice réciproque, et les interactions de type parasitisme qui ne sont bénéfiques que pour un seul des partenaires et qui font appel aux notions de conflit et d'antagonisme.

*Les interactions de type mutualisme* – La capacité à réaliser des associations symbiotiques est reconnue comme un facteur majeur de l'évolution des espèces. Certaines questions ont fait l'objet de publications importantes dans le domaine, par exemple en ce qui concerne les effecteurs symbiotiques microbiens et les voies de signalisation chez l'hôte, leur identité et les patrons évolutifs. Dans de nombreux écosystèmes, les organismes impliqués dans les interactions de type symbiose sont nombreux et diversifiés et les effets sur l'hôte sont la résultante directe et indirecte d'un fonctionnement en réseau de ces organismes, ce qui leur confère un intérêt écologique supplémentaire. Il semble donc important de considérer sur ces aspects des approches intégrées (biologie des organismes, des populations et des communautés). Dans ce contexte, l'écologie chimique, un des thèmes prioritaires de INEE, connaît un plein essor, stimulé par les avancées en chimie analytique où les innovations techniques extraordinaires permettent de séparer des mélanges complexes pour isoler et identifier les composés individuels, souvent à

partir de quantités infimes mais actives au niveau biologique. Par ailleurs, des avancées conceptuelles en écologie évolutive et en écologie comportementale ont mis à jour de nouvelles questions sur le rôle important de la médiation chimique dans les interactions spécifiques et dans le fonctionnement des communautés.

*Les interactions de type parasitisme* – L'effort de recherche vis-à-vis des interactions hôte-parasite est important et doit être placé dans le cadre des relations environnement-santé au sens large qui font partie des préoccupations prioritaires de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS. En effet, ces interactions intéressent la santé humaine, animale et végétale et sont le fait d'organismes pathogènes, parasites ou parasitoïdes. De plus, certaines interactions nouvelles apparaissent (émergences) ou réapparaissent (ré-émergence) en liaison avec des changements environnementaux, qu'ils soient naturels ou causés par l'homme, et il est alors nécessaire d'analyser les profils et les mécanismes de ces nouvelles interactions afin de prédire leur évolution.

**Évolution de la virulence et de la résistance.** Elle est aujourd'hui analysée par la méthode de l'évolution expérimentale. Par exemple, le pouvoir pathogène de bactéries (accumulation de mutations neutres ou sélection des individus les mieux adaptés) ou leur résistance aux antibiotiques (par sélection des individus les plus résistants) sont modifiés au cours des générations et l'on identifie, suit et analyse l'évolution des traits de virulence ou de résistance et les changements génétiques sous-jacents. Les recherches alliant l'analyse de la relation entre augmentation de la virulence et augmentation de la résistance aux drogues sont nécessaires afin de mieux appréhender l'extraordinaire flexibilité adaptative des pathogènes et de comprendre l'impact des traitements proposés sur l'évolution des pathogènes. Des modèles mathématiques appliqués à l'évolution menée par les traitements utilisés sont également nécessaires.

Une part importante des recherches concerne les mécanismes moléculaires impli-

qués dans les co-adaptations et les co-évolutions hôte-parasite et dans la virulence et la résistance des organismes pathogènes. De nouveaux outils tels que le typage à haut débit de SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms) ou le séquençage complet du génome permettent de mieux comprendre l'histoire évolutive des systèmes hôte-parasite ainsi que les déterminants moléculaires à la base de ces adaptations, l'idéal étant de trouver les molécules partenaires de l'hôte et du parasite, à la base des interactions. L'intérêt de lier virulence et variabilité génétique est de proposer un suivi épidémiologique grâce à l'utilisation de gènes marqueurs de virulence dont le rôle peut être analysé par la méthode d'inactivation. Il existe ici un lien avec les applications possibles en termes de Santé Publique (prévention des risques, développement de cibles thérapeutiques). Le rôle des facteurs épigénétiques dans l'adaptation des parasites (expression de différents phénotypes) à de nouveaux environnements tels qu'un changement d'hôte doit être étudié ainsi que le rôle particulier des éléments transposables (parasites ?) sur l'évolution des organismes.

**Écologie de la transmission.** La compréhension de l'écologie de la transmission des agents pathogènes ou parasites en lien avec les vecteurs et les hôtes réservoirs des maladies est un autre point important analysé par la section. Il s'agit de comprendre s'il existe une adaptation locale des pathogènes, d'analyser comment évoluent les traits d'histoire de vie et la valeur sélective des hôtes sous l'influence des parasites, comprendre comment évoluent les parasites sous l'influence de leurs hôtes et déterminer quelle est l'évolution du spectre d'hôtes (transferts latéraux) d'un pathogène et le rôle respectif de chacun des hôtes dans la transmission de la maladie (hôtes réservoirs). Enfin, la relation entre virulence et transmission est abordé de manière complète par l'étude de modèles emboîtés qui lient la dynamique épidémiologique (inter-hôtes) à la dynamique intra-hôte et permet de répondre à la question de l'existence d'un possible compromis adaptatif entre virulence vis-à-vis de l'hôte et transmission du parasite.

**Suivi épidémiologique spatiotemporel des pathologies.** Ce suivi, incluant dynamique et génétique des populations des pathogènes et de leurs hôtes, permet de cartographier (biogéographie) l'aire d'extension des pathogènes, de déceler les « points chauds », de hiérarchiser les facteurs structurants la répartition, et de détecter les zones émergentes et ainsi les nouvelles souches de pathogènes. L'augmentation des maladies émergentes et ré-émergentes nécessite le développement de recherches sur de nouveaux outils de **contrôle** des pathogènes, un exemple étant d'amener les pathogènes à une impasse évolutive en diminuant leur capacité d'adaptation. L'analyse de l'évaluation des risques pour les populations constitue un aspect appliqué des recherches de la section en coopération avec d'autres organismes nationaux (IRD par exemple) ou étrangers (tels que les Ministère de la Santé des Pays du Sud).

Les **interactions** sont souvent très **complexes** et de nouvelles formes d'analyses sont aujourd'hui nécessaires afin de se rapprocher le plus possible des conditions réelles. L'étude des interactions entre un parasite et son hôte est parfois réductrice aux seules relations entre ces deux partenaires alors que cet hôte est connu pour être très souvent en interaction avec un deuxième, voire plusieurs autres parasites. Ainsi, le multi-parasitisme devrait être considéré comme une situation des plus communes et le réseau d'interaction est donc plus complexe. Les études actuelles en écologie évolutive et les connaissances moléculaires du génome peuvent participer à y répondre grâce à l'évolution expérimentale, à l'inhibition de l'induction de variabilité chez les pathogènes par suppression des transferts latéraux de résistance ou de virulence, ceci permettant de réduire les potentialités d'adaptation des pathogènes aux changements environnementaux, et enfin grâce à la maîtrise de l'évolution des pathogènes. Les mesures de contrôle devraient intégrer les analyses de multi-parasitisme afin d'être les plus efficaces possible. La complexité des interactions se retrouve également lors des expositions aux agents pathogènes qui sont très souvent multiples et les doses souvent faibles (trickle infections).

D'où un niveau d'interaction supplémentaire, les interactions entre pathogènes appartenant à la même espèce, ce qui touche à la notion de compétition intraspécifique.

## 2.3 DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITÉ

Ce domaine de recherche a l'avantage de transcender et de combiner différentes échelles d'études de la biodiversité de plusieurs ordres de magnitude. On explore ainsi des processus et des phénomènes allant du temps profond de la paléontologie ou plus généralement de l'analyse phylogénétique et écologique de la macroévolution, au temps sub-actuel de la phylogéographie ou de la génétique des populations et enfin au temps actuel avec le fonctionnement présent des populations et son devenir sous l'influence des actions humaines sur les écosystèmes et du changement global. Ces différentes échelles permettent analogies et comparaisons entre événements passés et sub-actuels ou présents (par exemple, en ce qui concerne les crises de la biodiversité). Elles permettent aussi de concevoir l'emboîtement des échelles évolutives, en comprenant la sélection actuelle des adaptations des organismes basées sur des patrons d'organisation ancestraux.

L'ensemble de ce domaine est aussi enrichi par le renouveau de la systématique. Les approches comparatives phylogénétiques prennent en compte la diversité du vivant au-delà de quelques organismes-modèles. Elles sont basées sur des échantillonnages du vivant qui dépassent les inventaires passés grâce à l'utilisation de protocoles et d'outils rigoureux. Parmi ces outils, figure notamment la taxonomie moléculaire, plus connue récemment sous le nom de «barcoding», qui utilise quelques marqueurs génétiques pour accélérer l'identification et la mise à disposition des données d'échantillonnages. D'autres outils sont moins bien maîtrisés mais leur importance les rendra bientôt indispensables, telles les bases

de données de la biodiversité qui devront interfacer efficacement données d'échantillonnage, barcodes avec la taxonomie et les collections traditionnelles existantes (herbiers, collections zoologiques et collections vivantes). À cet égard, les méta-analyses (métagénomique, méta-acoustique) devraient prendre également une importance croissante. Ces analyses permettent d'obtenir rapidement des vues globales de la biodiversité à l'échelle de communautés. Leur interaction avec le barcoding se développera également rapidement, permettant des allers et retours entre échantillonnages à l'échelle des communautés et données spécifiques.

Les approches de la biodiversité des temps profonds ont donc été renouvelées par l'utilisation de plusieurs outils et méthodes. L'analyse phylogénétique moléculaire a permis d'apporter des éléments nouveaux dans l'histoire profonde des adaptations, par exemple chez les microorganismes ou chez les Chordés. On a pu ainsi récemment retracer les caractéristiques de LUCA en matière de préférences environnementales (hyperthermophilie). Des caractéristiques nouvelles pour l'ancêtre des Chordés ont aussi pu être inférées. Les Tuniciers étant en fait le plus proche parent des Chordés, la crête neurale et les placodes olfactifs des vertébrés sont en fait des spécialisations bâties sur des organes ancestraux préexistants.

De nouvelles analyses de la biodiversité et une réévaluation du cadre chronologique ont permis de mettre en évidence la rapidité insoupçonnée de la phase de récupération de certains organismes marins (*e.g.* cephalopodes ammonoïdes), après des changements majeurs de leur environnement comme ceux qui sont à l'origine de la crise permo-triassique il y a 253 Ma. La découverte de nouveaux fossiles a également permis des percées fondamentales dans la connaissance et la diversification des organismes. Ainsi en est-il de l'encéphalisation chez les vertébrés, avec la caractérisation précise et en 3D du cerveau minéralisé d'un vertébré de 300 millions d'années, grâce au rayonnement synchrotron. Ce sont aussi de nouvelles découvertes sur le terrain qui ont révélé, grâce à des méthodes phylogénétiques

et de rayonnement synchrotron, que le berceau des primates anthropoïdes ne se situait pas en Afrique comme on le supposait jusqu'à présent, mais probablement en Asie.

En ce qui concerne des périodes plus récentes de la biodiversité, l'étude biogéographique et évolutive revisitée de berceaux fameux de la biodiversité (Madagascar, Nouvelle-Calédonie) avec des méthodes phylogénétiques et écologiques ont permis de montrer que les modèles anciens étaient souvent caricaturaux. Le timing des diversifications est souvent plus rapide qu'il n'était envisagé autrefois, avec une importance manifeste des phénomènes de dispersion à courte et à longue distance qui ont permis le peuplement des zones à forte biodiversité (« hot spots ») notamment même dans des îles d'origine continentale supposée. L'utilisation des méthodes de modélisation de niche couplées avec des études phylogénétiques et génétiques de la spéciation a amené également à concevoir des spéciations rapides dans ce cadre biogéographique, que cela soit sur un mode fondamentalement adaptatif ou par conservatisme de niche. La dispersion est aussi un paradigme qui permet de tester l'origine et les modalités de construction des assemblages d'espèces. Ce paradigme s'applique également aux espèces invasives dont l'importance sociétale est considérable. Des études moléculaires ont permis de montrer que les invasions résultent très souvent d'ensemencements multiples, avec une variabilité génétique importante de départ.

La destruction des habitats naturels, l'exploitation excessive des ressources et l'introduction d'espèces exotiques ont été identifiées comme les principales causes de disparition d'espèces observées depuis 1700, engendrant des taux d'extinction comparables à ceux des cinq grands événements d'extinction du passé géologique. S'y ajoute aujourd'hui le changement global, sous ses différentes composantes. La conservation de la Biodiversité représente maintenant une priorité en matière de politique de l'environnement. Or l'humanité domine, ou mène une gestion directe ou indirecte sur presque tous les écosystèmes de la planète : l'exploitation

des ressources associée à cette domination est responsable de la « crise de la biodiversité » aux échelles locales, régionales et planétaire. Les activités humaines, depuis des siècles mais à un rythme qui s'est accéléré récemment, entraînent en effet deux modifications majeures : la dégradation quantitative et qualitative des habitats naturels, issue des changements d'usage des terres (déforestation, agriculture), et un réchauffement climatique, largement issu de l'utilisation massive des énergies fossiles et de l'émission de divers polluants. Ainsi, la gestion des ressources naturelles est aujourd'hui considérée comme incontournable par les politiques publiques, et constitue l'un des piliers du développement durable, objectif du prochain millénaire par ses retombées économiques, sociales et biologiques. Le sommet de la Terre à Rio (1992), puis le sommet mondial pour le Développement Durable tenu à Johannesburg en 2002, ont consacré la gestion viable des ressources naturelles comme condition préalable au développement économique et social. Poursuivant cette dynamique, et respectant les engagements pris lors de ces deux sommets, la France a adopté une « Stratégie Nationale du Développement Durable ». Progrès économique et social d'un côté, et maintien de la qualité de l'environnement de l'autre (incluant la biodiversité) constituent la clé de voûte de cette stratégie, qui a pour objectif de concilier besoins sociétaux immédiats sans compromettre la gestion future des ressources.

Quelles sont les conséquences prévisibles du changement global sur la biosphère, dans le temps et dans l'espace, quels sont les processus impliqués, et quelles alternatives et solutions la société pourrait-elle engager ? Ce sont aujourd'hui les questions posées par les citoyens aux politiques, les politiques aux experts, et les experts aux chercheurs. L'Écologie, la science qui étudie les relations entre les êtres vivants (homme compris) et leur environnement, se place tout naturellement au carrefour des préoccupations sociétales majeures qui découlent des conséquences des activités de l'homme. Par son approche évolutive qui autorise la prédiction par la compréhension des mécanismes, par sa place centrale dans

les sciences de l'environnement et par son caractère transdisciplinaire, l'écologie apparaît comme la discipline scientifique privilégiée qui aidera à identifier les processus en jeu (biologiques ou même sociaux), et par là même, à transposer des mesures de gestion appropriées au niveau sociétal.

Les contraintes environnementales que subissent les organismes varient souvent de manière stochastique à une échelle locale, mais il existe aussi des tendances à long terme sous l'effet principal de l'action de l'homme sur la biosphère. Cette action entraîne des évolutions de la distribution et de l'abondance des animaux ou des plantes bien plus rapides que par la plupart des mécanismes naturels, fournissant donc des conditions quasi-expérimentales pour les recherches dans ce domaine, mais posant également des questions à la société, notamment sur la conservation de la biodiversité, et plus généralement sur le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des anthropo-systèmes (rôle de la biodiversité dans les agro-écosystèmes par exemple).

Le champ des recherches fondamentales portant sur la composition, l'histoire et la dynamique de la biodiversité est un préalable indispensable à la compréhension des processus à l'origine des capacités de réponses des organismes et des communautés aux changements de nature anthropique. Cette compréhension permet ensuite la mise en oeuvre d'action de conservation, de gestion et de valorisation de la biodiversité, en couvrant aussi bien la gestion des espaces que celle des espèces, qu'il s'agisse d'espèces menacées, invasives ou exploitées (chasse, agriculture, pêche). L'ambition est ici quadruple : développer une recherche fondamentale sur l'origine et le maintien de la diversité ; à partir d'une meilleure compréhension des mécanismes et processus impliqués, élaborer des modèles prédictifs (projection, simulations, prédictions) de l'évolution de la biodiversité dans le cadre des effets du changement anthropique ; fournir ensuite une expertise, un diagnostic et donc des pistes de remédiation (écologie de la remédiation, biologie de la conservation).

## **2.4 ÉCOLOGIE FONCTIONNELLE : COMPRENDRE LES MÉCANISMES QUI AFFECTENT LA BIODIVERSITÉ**

L'approche classique en biologie évolutive postule que les gènes codent pour le phénotype, que le phénotype détermine la performance d'un organisme dans son environnement naturel en réponse à des stimulus écologiques ou évolutifs, que la performance détermine la valeur sélective de génotypes alternatifs et enfin, que la valeur sélective détermine la fréquence des génotypes dans la génération future, le tout selon un processus récurrent. Ainsi en biologie évolutive, les différences observées entre les traits d'histoire de vie des espèces sont considérées comme ayant une base génétique et reflétant l'optimisation des phénotypes dans un environnement particulier. Les études sur les traits d'histoire de vie se sont traditionnellement intéressées à la démographie et au comportement, en se concentrant sur le succès de la recherche alimentaire ou d'appariement, le succès reproducteur et la survie qui représentent tous le résultat de l'interaction entre l'organisme et son environnement. Dans cette approche, la physiologie de l'individu a traditionnellement été considérée comme supportant plutôt que contrôlant la réponse des différents traits d'histoire de vie en réponse à l'environnement. Or la biologie évolutive a pour but d'expliquer non seulement le pourquoi de la biodiversité, mais aussi le comment de la pluralité des traits d'histoire de vie, lesquels englobent les caractéristiques morphologiques, physiologiques et comportementales des organismes vivants.

Cette constatation a conduit au développement récent d'études mécanistiques évolutives, qui ont montré que la réponse des individus aux variations de leur environnement est médiée par des réponses morphologiques, comportementales et physiologiques tels que le métabolisme de repos, la dépense énergétique totale ou encore l'action pléiotropique des régulations hormonales. De ces interactions va résulter la valeur sélective des individus, et le cadre dans lequel ces inter-

actions vont pouvoir varier est limité par des contraintes définies par l'histoire évolutive des espèces. Ces contraintes restreignent donc les capacités de réponse des individus aux changements environnementaux et se répercutent in fine sur les capacités dynamiques des populations. L'appréhension avec justesse de ces interactions apparaît de plus en plus importante dans le contexte de l'impact des activités humaines sur la biodiversité, qu'il soit direct à travers la surexploitation des ressources et la destruction des habitats, ou indirect par le réchauffement climatique. Pour comprendre les mécanismes impliqués, l'écologie est en train d'évoluer vers une approche plus fonctionnelle. En effet, au delà d'une solide approche en biologie évolutive, la prédiction des conséquences des changements globaux sur les organismes vivants ne peut être envisagée sans avoir déterminé au préalable les capacités d'acclimations des populations à ces changements, ce qui passe par la définition des limites des réponses à l'échelle de l'individu. Les réponses individuelles ne dépendent pas uniquement de processus physiologiques, elles sont également liées à des caractéristiques telles que l'âge ou l'expérience ; caractéristiques qui participent tout autant à la valeur sélective individuelle. Cette recherche des processus écologiques se place donc d'abord à l'échelle des individus, à travers l'étude des effets de l'environnement sur les phénotypes, l'ontogenèse et les traits d'histoire de vie. En effet, l'information environnementale (climat, ressources) est traduite en réponse éco-physiologique et écologique (condition reproductrice, date de reproduction, taille et qualité des pontes, succès reproducteur) via une cascade de processus hormonaux dans un premier temps, qui déterminent en partie le degré d'adaptation des organismes aux modifications de l'environnement. Ce degré d'adaptation peut se manifester à court terme sur la plasticité des phénotypes, les comportements et les taux décrivant les transitions démographiques dans les cycles de vies des espèces. La physiologie évolutive essaye de découvrir les étapes permettant de lier la réception d'un stimulus écologique ou évolutif (stress) par une population et la manifestation de sa réponse

(sélection, extinction ou autre) en termes de traits physiologiques. La physiologie de la restauration, quant à elle, offre des perspectives intéressantes pour étudier les réponses de l'individu (et in fine de la population) aux contraintes de l'environnement, en particulier celles générées lors de la dégradation et de la restauration de l'habitat.

À moyen ou long terme, des changements environnementaux directionnels peuvent aussi entraîner une réponse génétique avec des processus microévolutifs. De nombreuses études sur les vertébrés ont par ailleurs révélé la disparité des contributions individuelles aux générations futures, ainsi que les conséquences concrètes de cette disparité sur la dynamique et la persistance des populations. Cette hétérogénéité individuelle est largement associée aux différences de qualité individuelle directement impliqués dans l'acquisition et l'utilisation des ressources. Au cours des dernières années, des études mécanistiques ont commencé à se développer sur la base de suivi, à long terme et sur de grands échantillons d'individus dont les histoires de vie sont connues et dont l'activité *sensu lato* est appréhendée par le truchement de systèmes de suivi automatiques ou par la mise au point de méthodes de biologie moléculaire adaptée à la mesure d'un grand nombre d'échantillons biologiques. Cette nouvelle voie d'investigation a énormément bénéficié des développements technologiques de ces dernières décennies. L'étude des compromis entre les différents traits d'histoire de vie s'est complexifiée par la mise en place d'études fonctionnelles par opposition au seul recours aux corrélats phénotypique ou génétique pour identifier, par exemple, l'existence de compromis dans les allocations d'énergie en fonction des contraintes environnementales. La combinaison d'approches génétiques, environnementales, populationnelles, physiologiques et moléculaires dans une approche écophysiologique et pluridisciplinaire a montré leur puissance dans l'étude des traits d'histoire de vie classique. L'un des progrès les plus remarquables procède des avancées réalisées en micro-électronique qui permettent de développer des systèmes embarqués (biologgers) de plus en

plus performants. De tels appareils, attachés sur des animaux évoluant librement dans leurs milieux naturels, collectent de nombreuses variables biotiques (température corporelle, comportement alimentaire, accélération, positions, profondeurs de plongée, etc.) et abiotiques (température ambiante, gradients de salinité, etc.) à des échelles de temps et d'espace très fines. Ces outils, associés au suivi satellitaire, révolutionnent actuellement l'écologie animale.

## **2.5 ASSEMBLAGE DES COMMUNAUTÉS : NOUVEAU CADRE CONCEPTUEL POUR L'ÉCOLOGIE DES COMMUNAUTÉS**

Pourquoi certaines régions abritent-elles plus d'espèces que d'autres? Pourquoi, dans ces régions, certains peuplements contiennent-ils plus d'espèces que les autres? Comment se maintient la diversité dans ces peuplements riches en espèces? Pourquoi une espèce n'exclue-t-elle pas toutes les autres? Des espèces ont-elles plus de chances d'être redondantes du point de vue de leur rôle dans l'écosystème si elles sont évolutivement proches? Ces questions fondamentales ne sont pas nouvelles, ce sont même certaines des questions classiques de l'écologie, mais elles revêtent aujourd'hui une importance toute particulière dans un contexte de changement global et d'érosion de la biodiversité. L'écologie des communautés (ou des peuplements) cherche donc à comprendre quels sont les déterminants de la présence et de l'abondance des espèces en fonction de leur environnement tant biotique qu'abiotique. Jusqu'à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, le cadre conceptuel au sein duquel cette sous-discipline de l'écologie a tenté d'être comprise a été celui de la théorie des niches écologiques. Dans cette perspective, la niche fondamentale est définie comme la capacité d'un organisme à persister dans un environnement, compte tenu des conditions environnementales. Une espèce peut être absente de

régions de sa niche fondamentale, parce qu'elle en a été exclue par voie de compétition, ou parce que ces régions correspondent aussi à des régions géographiques dans lesquelles elle n'est pas encore parvenue à se disperser. L'une des raisons principales du succès de la théorie des niches réside dans sa capacité à offrir une interprétation compétitive au déplacement de caractères entre espèces apparentées, un mécanisme pouvant conduire à la diversification écologique des lignages et potentiellement aussi à l'évolution de la niche.

Bien que conceptuellement importante et riche, la théorie des niches ne manque pas d'ambigüités parce qu'il est difficile de documenter précisément les exigences écologiques de toutes les espèces d'une communauté écologique. Ainsi, malgré de nombreuses tentatives, les mises à l'épreuve de la théorie se sont longtemps heurtées aux manques d'outils pour générer des hypothèses acceptables, mais aussi à l'absence du canevas phylogénétique approprié pour valider les interprétations écologiques relatives à l'histoire évolutive des espèces coexistant dans un même milieu. Pour ces raisons, la recherche en écologie des communautés a connu une crise d'une vingtaine d'années à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, au profit de l'écologie des populations, plus clairement ancrée dans l'approche expérimentale, et mieux formalisée au plan mathématique.

La réémergence de l'écologie des communautés depuis une dizaine d'années peut être comprise à la lumière de plusieurs changements. D'une part, l'écologie des communautés répond aujourd'hui à une demande de plus en plus pressante de comprendre la structure de la biodiversité, en particulier les déterminants de la distribution spatiale des espèces et des « points chauds » de la biodiversité, ainsi que la rareté des espèces à différentes échelles d'espace et de temps. La biologie des populations se focalise par définition sur une ou quelques espèces modèles, dont la biologie et l'écologie ne reflètent pas nécessairement la complexité des assemblages d'espèces que l'on rencontre dans la nature. D'autre part, les conférences internationales sur la biodiversité et le Millenium Ecosystem Assessment ont

convaincu la société et les chercheurs de la nécessité de savoir dans quelle mesure la biodiversité est garante du bon fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère. Enfin, les outils issus de la biologie moléculaire ont connu de tels développements qu'il est maintenant possible d'élargir les questions au-delà de la diversité génétique de quelques espèces modèles, pour prendre en compte l'ensemble des espèces coexistant localement dans une communauté écologique.

Ce transfert de méthodes et de concepts entre la génétique des populations et l'écologie des communautés a largement motivé l'émergence d'une nouvelle théorie « neutraliste » de la biodiversité où les communautés sont vues comme suivant une marche aléatoire et les espèces au sein d'une communauté considérées comme fonctionnellement équivalentes. Cette théorie qui s'inspire explicitement de la théorie neutraliste de l'évolution moléculaire offre aujourd'hui des outils robustes pour mettre à l'épreuve différentes alternatives en présence, notamment identifier la part de la variabilité due aux phénomènes stochastiques liés à la démographie et à la dispersion et celle due aux processus complexes de niche et de compétition. Elle permet également d'intégrer les dimensions locale et régionale des interactions entre espèces et de tirer parti des nouveaux modèles de « métacommunautés », qui sont des extensions du concept de métapopulation aux communautés d'espèces, pour estimer par exemple la taille du réservoir régional d'espèces qui influence la dynamique locale des communautés. Cependant, l'analyse fine des motifs d'abondances d'espèces révèle que l'importance des phénomènes stochastiques peut varier selon l'échelle spatiale. Dans les communautés d'arbres des forêts tropicales, par exemple, des dynamiques non neutres détectées à l'échelle locale (processus de niche) disparaissent dès lors que l'analyse est réalisée à des échelles régionales, voire continentales. La prise en compte d'autres types d'information que la seule abondance des espèces, par exemple sur les réseaux d'interactions mutualistes, trophiques ou parasitaires, qui ont potentiellement un impact considérable sur la dynamique des communautés, et

le développement de modèles explicitant mieux la dynamique et/ou les mécanismes en jeu à différentes échelles spatiales restent des enjeux cruciaux pour la modélisation des communautés écologiques.

Récemment, l'avènement du séquençage de l'ADN ultra-haut débit et les progrès de la systématique moléculaire ont favorisé l'émergence d'une nouvelle thématique appelée phylogénétique des communautés, dont l'objectif principal est d'évaluer les modalités d'assemblage des communautés sans faire le présupposé que les espèces étroitement apparentées sont nécessairement proches au plan écologique. Outre la reconstruction des trajectoires biogéographiques et des événements de spéciation, la prise en compte de l'histoire évolutive des espèces en interaction permet d'obtenir des informations inédites sur les processus d'assemblage des communautés. Ainsi, l'analyse de la structure phylogénétique des communautés pour lesquelles on dispose d'informations sur les traits des espèces et la variabilité environnementale à différentes échelles d'espace permet d'identifier les situations où les processus de niche et de compétition jouent un rôle important dans l'édification des communautés. Des résultats récents indiquent également que l'intégration de l'information phylogénétique permet de mieux estimer les paramètres des modèles neutres. Par ailleurs, divers travaux ont montré que la diversité phylogénétique des communautés fournit une mesure plus intégrative de la biodiversité et qu'elle est aussi un meilleur prédicteur de la diversité fonctionnelle que la diversité taxinomique. Cependant la thématique est encore jeune et de nombreux points conceptuels et méthodologiques restent à éclaircir : intégration statistique des mesures de diversité pour mieux tester les hypothèses sur la diversification des organismes, prise en compte des processus stochastiques de structuration des communautés, recherche de critères et d'indicateurs nouveaux pour évaluer l'impact des changements globaux sur la biodiversité écologique, phylogénétique et fonctionnelle.

Les nouveaux développements de l'écologie des communautés aux interfaces entre

écologie, évolution, et génétique sont particulièrement appropriés pour l'étude des communautés hyperdiversifiées, notamment les communautés microbiennes. Les premières analyses des motifs de distribution de la biodiversité microbienne à différentes échelles d'espace suggèrent que ces communautés sont loin d'être ubiquistes et que la limitation de la dispersion et le contrôle environnemental sont mêmes des forces importantes dans leur structuration géographique à petite échelle. Des approches expérimentales très novatrices commencent également à voir le jour. Par exemple, des travaux récents d'évolution expérimentale de métacommunautés de la bactérie *Pseudomonas fluorescens* ont permis de proposer, pour la première fois, une explication mécaniste à la relation entre biodiversité et productivité observée dans de nombreux écosystèmes.

### **3 – THÈMES TRANSVERSAUX : ÉVOLUTION, RÉSEAUX, MODÉLISATION ET BIOINFORMATIQUE, SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES, INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE**

Les thématiques développées par les chercheurs de la 29 répondent directement ou indirectement à des questions sociétales sur le maintien de la Biodiversité terrestre et marine. En retour, la société pose à la science des questions transdisciplinaires. Cette pression nécessite que les chercheurs se positionnent d'urgence sur :

- la façon dont ils s'approprient (volontairement ou non, consciemment ou non) ou pas ces questions, à titre individuel (éthique), à titre collectif (stratégies de recherche, programmation,

fléchages...) et sur le plan historique (rôle des modes scientifiques, de la pression de la valorisation, etc.). Exemple en écologie : les environnements anthropisés, écologie urbaine...

- la façon dont ces questions transversales posent – ou pas – des questions de recherche originales et recevables. Exemple disciplinaire : domestication et coévolution hôtes-parasites en écologie de la santé ; exemple très interdisciplinaire : les services écosystémiques.

- les équilibres entre le maintien et le développement des compétences disciplinaires et le développement des priorités trans-disciplinaires, et les éventuelles spécificités de programmation et de formation.

- la façon de s'organiser collectivement face à la demande sociétale, sans préjuger de la réponse (services de prospective ; demandes sociétales émanant des directions scientifiques)

À titre d'exemple, quelques grands enjeux transversaux qui demandent une réflexion stratégique inter-instituts du CNRS et inter-organismes peuvent être mentionnés :

- biodiversité : si le concept de biodiversité est utile sur le plan médiatique et politique ; l'est-il sur le plan scientifique ?

- changement climatique : implique des liens directs avec des questions disciplinaires plus classiques en écologie évolutive (structures des communautés, variations relatives des temps évolutif et temps écologique, influence sur les interactions, plasticité phénotypique vs. variabilité génétique, trade-offs et coûts, contexte écologique de la biologie de l'invasion ou des émergences, etc.)

- changement d'usage des terres (écologie spatiale et échanges-migrations, emboîtements d'échelles, transferts énergétiques et structure de la ressource, gradients d'anthropisation : urbanisation ou intensification agricole, etc.)

- écotoxicologie : interfaces entre les gradients de niveau d'organisation, d'intensité, de nature, de durée des contaminations et les processus écologiques et évolutifs, écologie chimique des processus de remédiation

– services écosystémiques (SE): nature, quantification et hiérarchisation entre eux (synergies, trade-offs); relations socio-culturelles (les SE et leur hiérarchie ne sont pas les mêmes dans différents pays, notamment Nord versus Sud, ou à différentes époques de l'histoire...)

– la prise en compte des risques (naturels ou liés aux stratégies de gestion) est-elle de la science ou de l'ingénierie?

– l'ingénierie écologique et sa place dans la recherche fondamentale en écologie et évolution: un moteur économique et/ou un moteur sociétal (au sens de service public)?

De la réponse à ces questions transversales découle une autre série de questionnement sur, par exemple, quelles seront modifications ou priorités à apporter aux concepts, modèles, méthodes et outils d'expérimentation (exemple des zones ateliers, des observatoires de la biodiversité, des réseaux d'acquisition de données, des écotrons, des plateformes de modélisation, de phénotypage, etc.).

## 4 – LES MOYENS

### 4.1 INGÉNIEURS, TECHNICIENS ET PERSONNELS ADMINISTRATIFS (ITA)

Les ITA sont des acteurs à part entière de la recherche. Assurant le maintien et le transfert des savoir-faire technologiques, ils ont un rôle incontournable dans les programmes de recherche des disciplines couvertes par notre section. Cependant, la diminution du nombre de personnels techniques titulaires en particulier en catégorie C (par exemple les personnels de maintenance) a entraîné une nette augmentation de la précarité (contrats, vacations, prestataires sous-traitants, etc.). Cette diminution entraîne une perte des compétences spécifiques (naturalistes, botanistes,

entomologistes...), induit un investissement en temps pour la formation des personnels précaires et pose des problèmes de suivi des travaux de recherche. Un effort doit être fait pour inverser cette tendance qui nuit au bon fonctionnement des équipes et structures de recherche.

La recherche en biologie environnementale fait appel de plus en plus à l'acquisition de données à long terme qui résultent ou impliquent la création d'observatoires et de stations de terrain et à l'acquisition du très grand nombre de données issues des nouvelles technologies (pyroséquençage, barcoding...). Dans les unités, il existe un manque crucial de personnels pour gérer et exploiter l'ensemble de ces données. Un recrutement de personnels spécialisés, notamment dans les domaines de la bioinformatique et de la modélisation, apparaît indispensable.

La tendance actuelle à la création de plateformes techniques peut permettre la mutualisation des moyens et des compétences entraînant de ce fait une baisse du nombre de personnels affectés directement aux équipes. Dans le meilleur des cas, ceci peut se traduire par plus de responsabilités et d'autonomie mais aussi par un éloignement des contextes scientifiques dans lesquels ils ne sont qu'en partie impliqués. Il faut veiller à ce que le travail ne soit pas essentiellement des travaux de « routine ». Par ailleurs, la mise aux normes des laboratoires ou des protocoles pour répondre aux exigences nationales, européennes, ou des travaux en réseaux, va demander une implication de plus en plus poussée dans des processus de démarche qualité-sécurité-environnement. Ces processus demanderont la création de postes d'ingénieurs spécialisés dans le domaine.

La faible évolution des carrières et le trop petit nombre de promotions des ITA est un problème récurrent au CNRS et c'est un facteur de démotivation. Bien qu'actuellement efficaces, les plans de formation devront s'adapter à l'évolution continue des métiers et des fonctions dans le domaine des sciences du vivant. Des formations adéquates devront être mises en place, depuis les techniques d'études envi-

ronnementales (télédétection spatiale, systèmes d'acquisition de données...) jusqu'aux techniques de la génétique et de la biologie moléculaire. L'internationalisation de la recherche et la gestion de contrats européens implique la connaissance de textes et outils en constante évolution qui impose des formations particulières pour les personnels administratifs et de gestion (marchés, gestion financière, anglais etc.).

## 4.2 PLATEFORMES

La création de plateformes techniques et la mutualisation des compétences techniques se sont largement intensifiées au sein des laboratoires de la 29 au cours de ce dernier quadriennal. Ces plateformes ont permis le renforcement de l'interdisciplinarité et l'accès à des moyens techniques innovants. Deux types de plateformes sont nécessaires pour le développement de nos recherches : les plateformes analytiques (analyses chimiques, séquençage...) mais aussi des plates-formes expérimentales telles les Ecotron et les stations de terrain.

## 4.3 OUTILS

Les outils déployés par INEE (et avant EDD) ont permis d'apporter un soutien conséquent aux recherches engagées par les chercheurs de la Section 29, notamment pour les suivis à long terme, base indispensable pour des travaux pertinents sur les effets des changements globaux sur la Biodiversité

### **Base de données**

De nombreux laboratoires de la section 29 hébergent des collections et des bases de données indispensables au développement de leurs propres travaux mais aussi pour la mise

à disposition à l'ensemble de la communauté scientifique. Si la mise en place au niveau local relève d'initiatives ponctuelles, il existe un besoin pour centraliser ces bases au niveau de la communauté scientifique de la 29. Cette centralisation des bases de données engagées récemment par INEE permettra d'alimenter et de maintenir ces structures qui sont des référentiels indispensables pour l'étude de la Biodiversité et à sa modélisation. Elles seront aussi utiles pour de futures applications biotechnologiques sur les ressources naturelles.

### **Zones ateliers (ZA) et Observatoires Hommes-milieux (OHM)**

Les recherches engagées par les chercheurs de la 29 s'inscrivent souvent dans le long terme. L'existence de ces études à différentes échelles de temps nécessite des dispositifs spécifiques dédiés à aux études sur la dynamique de la Biodiversité. Une telle approche a pu être développée grâce à la mise en place par INEE de Zones Ateliers (ZA) ou des observatoires Hommes-milieux (OHM). Ces plateformes de recherche sont des outils indispensables et uniques pour répondre à des questions sociétales, déclinées à l'échelle des territoires, les échelles spatiales sur lesquelles se déroulent les processus environnementaux (gestion de l'eau, conservation de la biodiversité). Le réseau actuel des Zones Atelier est riche de 9 plateformes sur l'ensemble du territoire national, de quelques milliers d'hectares à l'ensemble du bassin versant de la Loire.

### **Les stations expérimentales**

Indispensable à la recherche en écologie ; les stations expérimentales permettent de mener grâce à des équipements choisis des expériences en conditions contrôlées ou semi-contrôlées. Ces stations sont situées dans des environnements contrastés et permettent l'accès à une grande variété de biotopes comme les milieux de montagne, de grande plaine, la méditerranée, ou encore les récifs coralliens.

## Les Ecotrons

Les Ecotrons sont des instruments nouveaux qui permettent de remplir un vide scientifique entre des expériences trop simplifiées en laboratoire et trop complexes en milieu naturel. Ils constituent un nouveau challenge technologique pour la mise au point de simulateurs expérimentaux d'écosystèmes permettant dans des conditions de contrôle optimal de mesurer les variables biologiques, physiques et chimiques en continu. Deux Ecotrons existent actuellement en France celui de Montpellier (en fin de phase de mise au point) et celui de Follejuif (encore en phase d'étude et de construction). Les Ecotrons sont maintenant inscrits dans les grands équipements du CNRS.

## 5 – RECOMMANDATIONS : RECHERCHE FONDAMENTALE ET INDÉPENDANTE ; INTERDISCIPLINARITÉ

L'ensemble de ces développements montrent à l'évidence que les recherches dans les domaines de l'écologie et de l'évolution néces-

sitent plus que jamais d'avoir une vision globale des questions dans la mesure où les solutions passent vraisemblablement par la compréhension des interfaces entre partenaires que ce soit au niveau moléculaire ou spécifique. Cela met en évidence la nécessité et l'importance des approches fondamentales et sans *a priori*, car il n'est pas toujours simple d'identifier les partenaires et de déterminer leur position dans un réseau.

Les développements cruciaux pour les années à venir, vont donc clairement, dans nos domaines comme dans bien d'autres, vers des approches systémiques. Ceci nous amène donc naturellement à des interactions entre disciplines comme la chimie notamment à travers l'écologie chimique, l'informatique, non seulement pour le traitement des données issues des expériences à « haut débit » mais également pour la modélisation des réseaux, les Sciences de l'Homme et de la Société.

Une des spécificités de la Section 29 est de travailler sur une échelle allant de la molécule à l'écosystème, en tenant compte de la composante environnementale, notamment à travers les changements climatiques de nature anthropiques ou non. Ceci permet donc d'aborder les différentes facettes de la biodiversité aussi bien à travers sa description que de la compréhension de sa genèse, de son maintien, de sa dynamique.



# 30

---

## THÉRAPEUTIQUE, PHARMACOLOGIE ET BIO-INGÉNIERIE

*Président de la section*

Pascal LAUGIER

*Membres de la section*

Jean-Marc BARRET

Yvan CANITROT

Chantal DAMAIS

Alain GARDIER

Pierre GILLET

MAXIME GUYE

CATHERINE HEURTEAUX

RALF JOCKERS

MARTINE KNIBIEHLER

ANNE-SOPHIE KORGANOW

TANGUI MAURICE

YVES MELY

SYLVAIN MIRAUX

GRACIELA PAVON-DJAVID

CÉCILE PERRIO

PIERRE PETIT

SANDRA PITTAVINO

PATRICE RICHARD

BRIGITTE RENÉ

DANIEL SCHERMAN

HEIDY SCHMID-ANTOMARCHI

### PRÉAMBULE

**La section 30** «Thérapeutique, pharmacologie et bio-ingénierie» émergeant aux deux instituts INSIS et INSB, est éminemment interdisciplinaire. Elle réunit tous les acteurs qui interviennent à toutes les étapes de la chaîne du développement des produits thérapeutiques et diagnostiques (mathématiciens, physiciens, informaticiens, ingénieurs, chimistes, biologistes, et dans une moindre mesure sciences humaines), qu'il s'agisse de la recherche fondamentale, translationnelle, voire même médicale. Sa richesse est : a) d'offrir aux chercheurs un cadre de communauté de pensée, d'objectifs et d'actions tournés vers l'innovation thérapeutique et le développement des technologies pour la santé et b) de favoriser une dynamique d'échange et de partage entre tous les acteurs, quelle que soit leur communauté d'origine, pour la conception de projets. Pour assurer la meilleure fertilité de ce terreau, la section 30 se doit de veiller par ses avis et recrutements à favoriser la bonne articulation entre les différentes communautés, renforcer les interfaces entre les sciences dures, les sciences pour l'ingénieur, les sciences biologiques et la recherche pré-clinique ou clinique, soutenir la mise en place de grands projets multidisciplinaires et favoriser l'émergence de structures porteuses de cette interdisciplinarité sur des thèmes à fort potentiel d'émergence.

Quatre grands domaines de prédilection de la section 30 sont examinés :

- identification des cibles pharmacologiques ;
- biothérapies et thérapies innovantes ;
- imagerie biomédicale ;
- bio-ingénierie (biomécanique, biomatériaux, ingénierie tissulaire).

D'autres approches (bio-informatique, biophotonique, robotique-suppléance-aide à la personne) ont naturellement leur place dans les thématiques de la section 30. Leur représentation y est encore embryonnaire, de par le nombre limité de laboratoires ou d'équipes reconnues par la section 30, de chercheurs de la section associés à ces thématiques ou d'experts siégeant au sein de la section et représentatifs de ces thématiques. Il serait même approprié de parler de sous représentation, compte tenu du fait que ces thématiques, tout comme les domaines de prédilection historiques de la section 30,

a) sont au cœur de l'interdisciplinarité, entre sciences dures et sciences biomédicales diagnostiques et thérapeutiques ;

b) sont au cœur du dispositif de recherche translationnelle entre Sciences pour l'Ingénieur, Biologie et Médecine ;

c) nourrissent des problématiques scientifiques et médicales très riches et à fort impact sociétal ;

d) tout en irriguant un tissu industriel d'entreprises françaises d'innovation (principalement sous forme de « start-up » et de PME).

À l'avenir, la section 30 souhaite s'ouvrir à ces thématiques en favorisant le décloisonnement des domaines de recherche, de façon comparable à ce qui a été réalisé avec succès en imagerie biomédicale par exemple, et en attirant un plus grand nombre de chercheurs, notamment des Sciences pour l'Ingénieur, vers ces disciplines. À titre d'exemple, nous évoquerons en détail le cas de la biophotonique, ses forces et faiblesses, et le cloisonnement persistant entre disciplines, défavorable au développement de grands programmes inter-

disciplinaires. Forte d'une longue expérience de l'interdisciplinarité, la section 30 reste un environnement scientifique, technologique et médical favorable à l'éclosion et à la maturation de projets d'innovation dans ces trois disciplines, particulièrement de projets relevant de la robotique-suppléance-aide à la personne en soutenant la recherche fondamentale et l'innovation par la combinaison de plusieurs technologies telles que : guidage d'instrument sous imagerie, recalage d'image, multimodalités, innovation chirurgicale, capteurs intelligents, robotique, télé-manipulation, chirurgie mini-invasive, dispositifs médicaux implantables...

## **1 – IDENTIFICATION DES CIBLES ET PHARMACOLOGIE (CELLULAIRE, MOLÉCULAIRE, INTÉGRATIVE, COMPORTEMENTALE), ÉVALUATION DES RISQUES THÉRAPEUTIQUES**

Concernant les orientations de la recherche fondamentale en Pharmacologie, il y a des éléments qu'on peut reprendre dans les Rapports de Conjoncture précédents car ces efforts doivent perdurer :

### **– En 2004 :**

a) améliorer l'efficacité de l'interdisciplinarité : Ex : Chimie-Biologie ;

b) améliorer le rôle des Délégations Régionales dans la gestion des programmes européens.

### **– En 2006 :**

Les anticorps monoclonaux thérapeutiques (maladies immunes inflammatoires chroniques, sclérose en plaques, cancers)

En dehors de ces points là, voici quelques réflexions concernant cette partie « Pharmacologie » :

## Remarques préliminaires

1 – Progresser dans le traitement des maladies grâce aux médicaments, c'est à la fois rechercher de nouvelles cibles thérapeutiques, et **optimiser l'utilisation des médicaments existants**. On met souvent l'accent sur la première étape, en oubliant que la deuxième peut également être source de progrès thérapeutique. Ainsi, optimiser l'efficacité des médicaments existants, cela peut être :

- étudier la synergie de deux médicaments agissant sur deux cibles moléculaires distinctes ;

- étudier des mécanismes de résistance aux traitements (antibiotiques, antidépresseurs, insuline, etc.) ;

- identifier de nouveaux marqueurs et tests (invasifs ou non invasifs) de diagnostic de pathologies ciblées. À l'image du couple (glycémie – médicaments antidiabétiques), co-développer les outils du diagnostic moléculaire (voies de signalisation) d'une pathologie et les médicaments actifs dans cette pathologie.

2 – La recherche de nouveaux médicaments est très coûteuse, notamment parce qu'elle nécessite un très haut niveau technologique. L'objectif étant de traiter plus efficacement des problèmes complexes, il faut donc favoriser la coopération et la réalisation de programmes communs entre les différents acteurs de la recherche qui ont des compétences complémentaires : favoriser les **partenariats public-privé**, donc internationaux, pour la prévention et la lutte contre les maladies émergentes (pandémies) et celles qui sont négligées.

## Ce qui manque

- donner plus de moyens (par des programmes spécifiques par exemple) pour soutenir des collaborations entre la recherche académique et industrielle en amont d'une application (d'un produit) spécifique (autre que le développement de réactifs ou d'outils diagnostics ou des prestations de service) ;

- soutien spécifique ciblé pour des approches pharmacologiques. Pour l'instant, le soutien existe uniquement en relation avec une maladie spécifique. Un soutien spécifique valoriserait clairement la pharmacologie et permettrait de justifier plus facilement des étapes spécifiques vers le développement de médicaments (preuve de concept d'un procédé, d'un nouveau concept, d'un test de criblage, etc.).

## Ce qui doit être soutenu

- tests de criblage en post-génomique (protéomique). Développement de plus de tests de criblage basés sur des interactions protéine-protéine ;

- investir dans une infrastructure nationale permettant de réaliser des tests de criblage en France (génération de brevets en France et pas à l'étranger) ;

- maintenir les disciplines associées : Pharmacocinétique et étude des voies d'administration et du métabolisme des médicaments ; pharmacogénomique ;

- **développer de nouveaux vecteurs viraux** pour véhiculer des gènes (ou des shRNA). Vecteurs viraux et thérapie génique ; cellules souches et autres traitements innovants : Les vecteurs viraux ou non viraux représentent des outils très prometteurs pour la recherche fondamentale et pour la thérapie génique chez l'Homme. C'est ainsi par exemple que les vecteurs lentiviraux dérivés du génome HIV permettent de délivrer et d'intégrer de façon efficace des gènes étrangers dans les cellules de Mammifères. Par rapport aux autres vecteurs viraux disponibles, ils présentent l'avantage de transférer de larges fragments d'ADN, qui seront intégrés de façon stable dans des cellules en division ou pas, et permettent l'expression à long terme des transgènes.

**Les verrous :** Cependant, aucun des lentivecteurs disponibles à ce jour ne permet une infection/expression sélective d'un type cellulaire donné en raison d'un fort contrôle de l'expression des transgènes par des promoteurs ubiquitaires. Ainsi, tous les types cellu-

laïres présents dans la région injectée vont exprimés le transgène porté par le vecteur.

**L'avenir :** Le développement de vecteurs capables de cibler des types cellulaires spécifiques est devenu une priorité absolue, afin de disséquer des systèmes complexes en définissant la fonction d'un gène dans une seule population cellulaire. Exemple en neurosciences fondamentale : les substrats neuronaux et moléculaires spécifiques qui sous-tendent une fonction cérébrale et un phénotype comportemental donnés sont encore inconnus pour de nombreux systèmes de neurotransmission.

Exemple : une région cérébrale comme l'aire tegmentale ventrale (ATV) possède une population cellulaire mixte composée de 70% de neurones dopaminergiques et de 30% de neurones non dopaminergiques, principalement des interneurons GABAergiques. Ces populations cellulaires du système méso-cortico-limbique jouent un rôle important dans les mécanismes d'addiction aux drogues (nicotine, morphine, cocaïne, alcool, etc.) et dans le mécanisme d'action de nombreux antipsychotiques. Plusieurs équipes cherchent à cibler de façon spécifique soit les neurones dopaminergiques, soit les neurones GABAergiques dans le cerveau de l'animal adulte afin de comprendre, par exemple, le rôle de la dopamine libérée lors de l'addiction à la nicotine. Ceci serait possible grâce à une nouvelle stratégie de transfert de gènes combinant un système Cre recombinase du bactériophage P1 qui reconnaît deux sites LoxP du lentivecteur. Ce système est capable d'enlever la séquence d'ADN d'intérêt, et d'activer ainsi l'expression du transgène dans un type cellulaire particulier.

– favoriser les études de la physiopathologie de l'animal « âgé », modèle animal de vieillissement cérébral, etc. et diagnostic, prévention des maladies chez les sujets âgés et traitements. Ceci est lié bien entendu au nombre croissant de personnes âgées et au développement des maladies neuro-dégénératives résultant du vieillissement de la population ;

– analyser les altérations survenant au cours du développement et ayant des conséquences physiopathologiques chez l'adulte ;

– identifier les réseaux de gènes, les circuits neuronaux en neurophysiologie, puis leurs altérations associées à diverses pathologies. **Séquençage à haut débit de l'ADN du génome humain :** Le séquençage du génome de cohortes de patients et la recherche de mutations peuvent révéler de nouvelles cibles thérapeutiques. Il faut soutenir la bio-informatique (postes au concours ?) pour développer les logiciels nécessaires à l'analyse de grandes quantités de données obtenues ;

– une maladie, une mutation d'un seul gène ? C'est vrai dans certains cas. Exemple : à l'origine du syndrome de Rett, une maladie neuro-dégénérative liée au chromosome X. Un seul gène muté, codant pour la protéine MecP2, mais qui contrôle la synthèse de plusieurs neurotransmetteurs monoaminergiques. Cette mutation expliquerait les anomalies comportementales et neurologiques des jeunes filles atteintes de ce syndrome ;

– mais le plus souvent, pour des pathologies complexes (pathologies familiales et *polymorphisme génétique*), l'approche génomique est essentielle et est toujours d'actualité : nous n'avons pas encore identifié un groupe de gènes et leurs mutations ou délétions qui seraient impliqués dans l'expression d'un phénotype pathologique particulier. On a cependant appris que l'association « altération d'un gène – une maladie » est le plus souvent réductrice. L'approche génomique est très souvent complétée par une approche protéomique (spectrométrie de masse) ;

– une approche pré-clinique chez le rongeurs ou le mammifère (primate non humain) peut être informative pour **l'identification des gènes d'intérêt** : souris génétiquement modifiées (voir ci-dessous) ;

– **développer des modèles animaux des pathologies humaines** (Pharmacologie intégrée) et leur phénotypage ;

– les modèles animaux de pathologies humaines sont loin d'être parfaits, mais ils sont indispensables pour explorer par exemple l'impact des gènes sur les maladies. Quelques uns sont proches des pathologies humaines car ils présentent des caractéristiques comportementales

les, physiques et neurologiques proches de la maladie humaine (exemple: souris « null » MecP2 du syndrome de Rett). D'autres modèles animaux ne miment que partiellement le phénotype pathologique humain (ex de **verrous**: souris « dépressive » ou hyper-anxieuse qui ne peuvent pas mimer exactement une pathologie anxio-dépressive humaine puisque le diagnostic repose pour une bonne part sur un questionnaire soumis au patient). Ces modèles restent cependant très utiles car ils donnent de précieuses informations sur les mécanismes physiopathologiques et favorisent la compréhension de la maladie et donc le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques. Il serait difficile de progresser en thérapeutique sans qu'il y ait de bons modèles animaux des pathologies humaines (Exemple: souris transgéniques porteuses d'un gène codant pour une protéine humaine – souris surexprimant la protéine  $\beta$  amyloïde humaine dans le cerveau, un des modèles animaux de la maladie d'Alzheimer);

– générer des lignées de **souris génétiquement modifiées**, *knockout* conditionnelles, inductibles, tissus spécifiques. Ces modèles sont intéressants pour étudier les récepteurs métabotropiques (à 7 domaines trans-membranaires couplés aux protéines G) car il y a encore quelques failles dans la sélectivité pharmacologique des antagonistes de tel ou tel sous-type de récepteurs de neuropeptides notamment. Cette approche est encore plus intéressante pour étudier les récepteurs ionotropiques (Ex: R-GABA A; R-NMDA du glutamate; R nicotinique de l'acétylcholine, etc.) car ils sont composés de 5 sous-unités dont la composition conditionne l'activité dans un tissu biologique ou une région cérébrale donnée. L'approche pharmacologique est dans ce cas plus limitée car il faut pouvoir disposer d'une molécule sélective d'une seule sous-unité ayant un rôle prépondérant dans l'activité du pentamère. On cherche donc quelle composition de ces cinq sous-unités, dans quelles régions cérébrales gouvernent quelles fonctions?

Exemple: varenicline (CHAMPIX®) = agoniste partiel se liant de façon sélective à l'association de sous-unités  $\alpha 4\text{-}\beta 2$  des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine.

Son rôle dans la libération de la dopamine dans le striatum ventral, et dans le sevrage tabagique vient d'être mis en évidence.

## CAS DE LA PHARMACOLOGIE ANTITUMORALE

Pendant des années les cellules cancéreuses ont été des boîtes noires, la démarche pharmacologique consistant à tester un nombre considérable de molécules sur des cellules tumorales *in vitro*. Les molécules ayant un effet soit en tuant les cellules, soit en arrêtant la prolifération étaient sélectionnées pour des essais sur les animaux puis sur l'homme. Par ce biais les molécules sélectionnées avaient pour cible les molécules en division, c'est-à-dire les cellules cancéreuses, mais également les autres cellules en division par exemple les cellules du sang. Depuis les années 1970 la recherche a permis de mettre en évidence un certain nombre de gènes impliqués dans le cancer tels les proto-oncogènes, les gènes suppresseurs de tumeurs, les récepteurs situés à la surface des cellules, on a mis en évidence la capacité des tumeurs à stimuler la croissance des vaisseaux sanguins les alimentant et on a fortement étudié les mécanismes de réparation du génome.

Au cours des 10 dernières années, les progrès de la recherche biomédicale dans les domaines de la génomique, de l'imagerie, de la protéomique et de la pharmacogénétique ont permis d'élargir le champ thématique de la pharmacologie antitumorale. Il inclut notamment la modélisation moléculaire, cellulaire et tissulaire des tumeurs; l'étude de l'initiation des tumeurs, de leur progression et de leur récurrence; l'utilisation de biomarqueurs pronostiques et prédictifs; l'analyse des facteurs de risque et des stratégies préventives; le développement des thérapies innovantes et personnalisées; les technologies pour l'imagerie de la tumeur et de son environnement; le transport des molécules-médicaments (vectorologie).

Ces avancées technologiques ont progressivement conduit au concept d'une méde-

cine développée au plus près du patient. Il est aujourd'hui concevable d'adapter les traitements aux profils et aux risques de chaque patient afin d'obtenir une médecine personnalisée qui devrait, à terme, révolutionner les approches thérapeutiques.

La mise au point de ces nouveaux traitements innovants repose sur ce que l'on appelle la **recherche translationnelle** : celle qui, associant chercheurs, médecins et patients, vise à transférer le plus rapidement possible les découvertes des laboratoires au chevet des malades.

Cette recherche translationnelle repose :

- sur la **génomique** : le développement des techniques des « *microarrays* » (biopuces) a permis d'analyser des altérations géniques et les expressions géniques à l'échelle du génome. La puissance de ces méthodologies a permis d'identifier un nombre considérable de nouveaux événements moléculaires associés aux processus de tumorigenèse spécifiques ou non de chaque cancer. Maintenant l'étape suivante est le séquençage intégral du génome pour chaque tumeur. L'étude des altérations génétiques de cellules issues d'une tumeur devrait permettre de définir les meilleurs stratégies thérapeutiques en déterminant les marqueurs prédictifs de la réponse à un traitement ;

- sur la **thérapie ciblée** : alors que la chimiothérapie cytotoxique ne visait que la prolifération cellulaire dans son ensemble, la chimiothérapie ciblée vise les mécanismes mêmes de l'oncogenèse. La prescription des molécules ciblées se fait en fonction de la présence ou non de la cible, de son état d'activation et de son rôle primordial ou accessoire dans la genèse de la tumeur considérée. L'existence de ces nouvelles thérapies entraîne une refonte des pratiques de l'oncologie médicale vers une individualisation des prescriptions (médecine personnalisée), fondée sur les paramètres biologiques de la tumeur et de l'individu ;

- sur la **vectorologie** : l'amélioration des soins passe en effet par la maîtrise du dosage, de la durée d'administration et de la vectorisa-

tion *in situ* du traitement afin d'acheminer une substance jusqu'à l'intérieur de la cellule spécifique pour l'y injecter, y compris dans une zone difficile à atteindre (cerveau par exemple).

Afin que cette recherche pharmacologique soit de plus en plus efficace il faut continuer à développer la recherche :

- sur le **développement de nouvelles molécules** : élargir et diversifier le spectre d'activité, augmenter la réponse clinique, diminuer les toxicités et les résistances sont toujours des critères pour le développement de nouvelles molécules susceptibles d'augmenter l'arsenal thérapeutique dans chaque classe de médicaments anticancéreux déjà existante. Cette recherche de nouvelles molécules repose sur une approche multidisciplinaire afin d'identifier et de développer de nouveaux agents antitumoraux possédant une action sélective et ciblée. **Sur le plan moléculaire**, il est nécessaire de recueillir des informations fondamentales comme, par exemple, sur les propriétés de reconnaissance des acides nucléiques et de certaines enzymes liant l'ADN comme les topoisomérases et plus récemment la télomérase. Ceci afin de développer des molécules ciblant précisément ces mécanismes de reconnaissance. Ces recherches doivent être effectuées au moyen d'études de cristallographie aux RX et de RMN, associées à la modélisation moléculaire. **Au niveau cellulaire**, les travaux doivent permettre d'appréhender la régulation de l'expression des gènes par ces molécules par des analyses pharmaco-génomiques. On peut ainsi sélectionner des composés à activités pro-apoptotiques. **Du point de vue thérapeutique**, cette approche concourt à l'émergence de nouvelles chimiothérapies mieux ciblées, moins nocives et donc potentiellement mieux tolérées par les patients ;

- le **développement de nouvelles lignées cellulaires, de modèles plus sophistiqués** tels les xénogreffes ainsi que des **développements technologiques** tels que la culture cellulaire en trois dimensions ;

- le **renouvellement des essais cliniques** et notamment le développement des

essais « précoces » permettant une amélioration de la collaboration et des interactions entre la recherche académique, industrielle et clinique pour une optimisation et une accélération du développement des médicaments.

## **2 – BIOTHÉRAPIES ET THÉRAPIES INNOVANTES**

### **2.1 NANO-OBJETS POUR LE BIOMÉDICAMENT ET LES THÉRAPIES INNOVANTES**

Les *nanosciences* et *nano-biotechnologies* ont pour objectifs la création, la maîtrise et l'utilisation d'objets de taille avoisinant le nanomètre. Les nanosciences portent sur la connaissance de ces systèmes et les nano-biotechnologies sur leurs utilisations biotechnologiques et médicales. Ces dernières sont très nombreuses. Elles incluent par exemple les capteurs-diagnostics miniaturisés qui peuvent être implantés pour une détection avancée des maladies, des systèmes pour l'assistance aux gestes médicaux et chirurgicaux, des nano-particules recouvertes pouvant améliorer la bio-activité et la biocompatibilité des implants, des nouvelles techniques d'auto-organisation permettant l'émergence de nouvelles générations d'ingénierie des tissus et de matériaux biomimétiques avec, à terme la possibilité de synthétiser des organes de remplacement.

Les nano-objets pour le bio-médicament et les thérapies innovantes peuvent être des liposomes, des nano-particules, des émulsions et des micelles, des dendrimères, ou encore des fullerènes ou nano-tubes de carbone. Sur ces nano-objets peuvent être greffés des protéines, peptides, fragments d'ADN et médicaments, comme par exemple des antibiotiques ou des antitumoraux. Des systèmes sélectifs se développent, ciblés par exemple vers des cellules tumorales pour les traiter par chauffage ou par photothérapie.

La France se situe au meilleur niveau international en ce qui concerne les nanosciences. Au niveau national, les éléments structurants du domaine des Nanosciences et des Nanotechnologies sont :

- 5 pôles régionaux aux compétences complémentaires et des centres de proximité ;
- des C'Nanos : 5 centres de compétences et bientôt 6 en Nanosciences qui ont été créés dans le cadre du Programme National Nanosciences sur la période 2004-2005 en tant que structures d'animation de la communauté (4 200 chercheurs répartis dans 185 laboratoires) ;
- des groupements de recherche (GDR) ;
- une « Cellule Nano » créée au CNRS en 2009 avec des représentants de chaque Institut.

### **2.2 THÉRAPIES INNOVANTES : THÉRAPIE GÉNIQUE ET CELLULAIRE**

La preuve du concept clinique des thérapies géniques émerge après plus de dix années d'efforts. Cette discipline, stable ces dernières années, est repartie en forte croissance. En effet, son potentiel clinique et biotechnologique est considérable pour le traitement des maladies incurables : maladies génétiques, maladies métaboliques, maladies cardiovasculaires, oculaires et du système nerveux, cancer, maladies infectieuses, vaccination génétique, etc. Ainsi, plusieurs vaccins génétiques existent déjà en médecine humaine et vétérinaire (immunisation génétique), des déficiences immunitaires sévères ont été guéries, et des cas de cécité ont été améliorés. Un produit de thérapie génique visant à faire repousser les vaisseaux des membres ischémiés, démarré avec la participation d'une Unité Mixte CNRS-Industrie, est en phase III de développement chez Sanofi-Aventis.

Les stratégies de thérapie génique reposent souvent sur des concepts très innovants tels que l'angiogenèse, l'anti-angiogenèse, l'utilisation de facteurs de croissance, ou la chirurgie du génome (voir section suivante).

En thérapie cellulaire, la modification ciblée de cellules souches bénéficie des avancées de la thérapie génique, utilisant des vecteurs d'ADN ou d'ARN viraux modifiés recombinants, ou encore non viraux. C'est en particulier le cas pour un secteur à croissance exponentielle : les *iPS*, ou cellules souches pluripotentes induites par transfert de gène, qui sont obtenues à partir de cellules différenciées telles que les fibroblastes.

On peut considérer que la France représente, avec la côte ouest des États-Unis, le leader mondial dans le domaine de la thérapie génique, et plus généralement de l'utilisation biotechnologique des techniques de transfert d'information génétique. La masse de compétences et d'activités existante au CNRS et au sein de l'Alliance AVIESAN regroupant les organismes de recherche dans le domaine du vivant représente un atout de compétitivité unique.

Ceci est obtenu grâce à plusieurs facteurs et composantes :

- excellence académique : présence de laboratoires de classe internationale dans les domaines des vecteurs d'administration de gènes et de la thérapie génique ;

- intense partenariat avec les associations de malades (en particulier l'AFM, Association Française contre les Myopathies, qui organise annuellement le Téléthon) ;

- engagement précoce d'industries dans la thérapie génique (Biomérieux via sa filiale Transgene à Strasbourg, Sanofi-Aventis via sa filiale Centelion, en région parisienne) et création de plusieurs jeunes pousses.

En, particulier, l'administration des séquences génétiques aux cellules peut être favorisée par des vecteurs chimiques (comme par exemple les polymères cationiques ou les lipides cationiques), des techniques physiques telles que l'électroporation, ou la sonoporation ultrasonore, la magnetofection, etc., ou encore des vecteurs viraux recombinants non infectieux tels que les virus associés à l'adénovirus, les lentivirus dérivés de celui d'HIV, les virus de l'herpès, etc. Par ses nombreux laboratoires

académiques dédiés, la France est un leader mondial dans ce domaine de « vectorologie ». Plusieurs de ces laboratoires sont coordinateurs de projets du 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> PCRDT. Enfin, le réseau d'excellence Clinigene, coordonné par une équipe française appartenant au CNRS, structure au niveau européen les approches de thérapie géniques et les plateformes associées, en ayant pour vocation de faciliter et d'accélérer le passage à la clinique.

## 2.3 CHIRURGIE DE L'ARN ET DE L'ADN

L'expression « chirurgie de l'ARN et de l'ADN » recouvre plusieurs stratégies thérapeutiques utilisant l'interférence ARN, le saut d'exon, et la réparation des gènes.

*L'interférence ARN* repose sur l'introduction dans les cellules de petits ARN double-brins, qui conduit à l'inhibition spécifique et très puissante de l'expression d'un gène donné. C'est un outil puissant permettant de déterminer la fonction des gènes par analyse au niveau cellulaire de l'impact de leur extinction. En outre, l'interférence ARN présente un fort potentiel thérapeutique pour toutes les pathologies où l'extinction de gènes a un effet bénéfique (cancers, pathologies virales, maladies génétiques). Enfin, la génération de banques d'ARN interférents couvrant l'intégralité du génome humain permet de faire du criblage à haut débit. L'objectif de telles études peut être soit l'analyse fonctionnelle des gènes (génomique fonctionnelle), soit de rechercher de nouvelles cibles pour des médicaments.

Enfin, la machinerie de l'interférence ARN est présente dans toutes les cellules mammifères et sert à réguler l'expression de notre génome. Les effecteurs naturels sont des petits ARN appelés micro-ARN ou miRNA. Ces connaissances ont ouvert un nouveau et important champ de recherche sur les petits ARN non-codants. En France, la mise en place de plate-forme proposant des criblages à haut débit a été soutenue par les institutions

de recherche. Si la recherche fondamentale sur les miRNA est bien représentée, la recherche appliquée destinée au développement de médicaments à base d'ARN interférents semble moins dynamique, en dépit de son fort potentiel.

*Le saut d'exon.* La chirurgie de l'ARN utilisant la machinerie d'épissage et conduisant au saut d'exon représente une autre approche prometteuse, dont on a démontré sur petit animal la faisabilité pour traiter la dystrophie musculaire de Duchenne. Cette maladie génétique des muscles est incurable. C'est la plus répandue des maladies génétiques, qui fait l'objet de l'attention particulière de l'AFM. En France, une approche faisant appel à un virus pour réaliser le saut d'exon a été développée.

D'autres pistes thérapeutiques basées sur la « **chirurgie de l'ARN** » sont également développées actuellement, en particulier le trans-épissage, ou encore la trans-lecture de codons stop par de petites molécules.

*La réparation génique.* Une stratégie alternative de thérapie génique consiste à « réparer » un gène muté. Différentes approches ont été développées dans ce but, comme par exemple l'utilisation de fragments d'ADN correcteurs, d'oligonucléotides synthétique, ou encore des virus adéno-associés. La limite de cette approche réside dans sa faible efficacité (généralement <1 %). Cependant, ce domaine de recherche a connu récemment un nouvel essor grâce au développement des méga-nucléases (société Cellectis, France), et de « doigts de zinc » conjugués à une endonucléase (société Sangamo, USA). Ces 2 approches permettent de réaliser une cassure double brin dans le gène muté cible, ce qui permet d'améliorer de manière très significative l'efficacité de réparation, utilisant un processus cellulaire appelé « recombinaison homologue ». Bien que, pour des études fondamentales, pour la création de lignées cellulaires productrices de protéines, ou encore pour la création de nouveaux modèles de souris, ces 2 techniques soient intéressantes, le développement d'approches thérapeutiques semble pour l'instant plus difficile à réaliser.

## 2.4 IMMUNOTHÉRAPIE

L'immunothérapie vise à développer des thérapies en stimulant la réponse immune lorsque celle-ci est défaillante, ou au contraire en la jugulant lorsqu'elle est excessive ou indésirable. De très nombreuses pathologies sont concernées par ce type d'approche, regroupant des affections aussi diverses que les réactions d'hypersensibilité, les déficits immunitaires, les maladies infectieuses, inflammatoires, auto-immunes, systémiques ou tumorales. L'immunothérapie se doit donc de proposer des traitements innovants, performants et variés pour répondre à la diversité des attentes thérapeutiques propres à chacune des pathologies.

Les champs d'investigation sont ainsi très vastes et interdisciplinaires (immunologie, thérapies cellulaire et génique, génétique, ingénierie des protéines, chimie, recherche clinique, etc.), favorisant de fait les interactions entre différents acteurs, notamment chercheurs fondamentalistes et cliniciens. Le foisonnement des découvertes fondamentales et/ou cliniques dans ces disciplines au cours des deux dernières décennies a engendré un réel bouleversement de l'immunothérapie en ouvrant des pistes prometteuses. Ainsi, de nouvelles stratégies thérapeutiques à action préventive ou curative, très différentes suivant qu'elles sollicitent directement les ressources du système immunitaire (immunothérapie active) ou au contraire qu'elles apportent des anticorps ou des cellules effectrices de la réponse immunitaire (immunothérapie passive), sont en cours d'évaluation ou sont d'ores et déjà disponibles pour certaines pathologies.

En cancérologie notamment, l'immunothérapie passive par anticorps monoclonaux et par transfert de lymphocytes T représente une réalité thérapeutique concrète, à un stade avancé de test clinique. En outre, des bénéfices thérapeutiques concrets sont espérés au travers du développement d'immunothérapies actives visant à modifier les cellules dendritiques, premiers acteurs de la réponse immune.

Dans les maladies auto-immunes, l'enjeu de l'immunothérapie est de restaurer la tolérance au soi, dont la rupture est à l'origine de ces maladies. Ici encore, les anticorps monoclonaux devraient jouer un rôle majeur. L'induction d'une rémission totale d'un diabète de diagnostic récent par un traitement de courte durée avec un anticorps anti-CD3 illustre cette possibilité, de même que l'utilisation d'anticorps anti-TNF $\alpha$  dans le cas de la polyarthrite rhumatoïde, accompagnée de peptides et petites molécules pour cibler des éléments de signalisation intracellulaire.

Il paraît important de mentionner les espoirs actuellement suscités par la stimulation des défenses anti-infectieuses innées ou adaptatives dans le contrôle des maladies infectieuses. Ces espoirs sont fondés : 1) sur la maîtrise des anticorps monoclonaux spécifiques contre les agents pathogènes, 2) sur l'amélioration des approches vaccinales bénéficiant de la nouvelle pharmacologie des récepteurs Toll, ainsi que 3) sur les thérapies cytokiniques et cellulaires. Cette liste non exhaustive des attentes suscitées par l'immunothérapie souligne les perspectives prometteuses de la discipline, mieux placée que toute autre à l'interface de la recherche fondamentale et de l'application clinique.

## 2.5 THÉRAPIES PAR AGENT PHYSIQUE

### Radio-immunothérapie et radiothérapie ciblée

La radiothérapie en général a beaucoup évolué depuis une cinquantaine d'années, et s'avère parfaitement intégrée dans les stratégies thérapeutiques multidisciplinaires, en particulier en oncologie. L'un des enjeux de la radiothérapie moderne est de limiter les séquelles induites par la destruction des tissus sains et des organes à risque au voisinage de la tumeur, en définissant plus précisément la zone tumorale, en ciblant l'irradiation, et en apportant la dose la mieux adaptée. Les déve-

loppements de l'imagerie, de l'informatique et des équipements ont contribué de façon déterminante à faire entrer la radiothérapie dans le XXI<sup>e</sup> siècle. Ces dernières années ont vu l'avènement de la radiothérapie conformationnelle 3D, la radiothérapie ciblée et la radio-immunothérapie (RIT) comme techniques de pointe prometteuses préservant au maximum le corps et entraînant moins d'effets secondaires.

La radiothérapie ciblée et la radio-immunothérapie sont une forme de radiothérapie interne basée sur l'administration d'un vecteur radioactif ou d'un radio-immunoconjugué approprié. Leurs domaines d'application sont principalement les cancers (thyroïde, ovaire, prostate, poumon, leucémie, lymphomes non hodgkiniens, mélanomes, tumeurs cérébrales). Les maladies infectieuses (SIDA) représentent un domaine en émergence. Ces techniques ont connu des évolutions notables grâce aux nombreux progrès, notamment en chimie, radiochimie et immunologie dans la synthèse de vecteurs spécifiques et de chélates de grande stabilité, dans l'humanisation et la fonctionnalisation des anticorps monoclonaux, et dans les techniques de radio-marquage et de ciblage. Elles peuvent être actuellement utilisées en routine clinique grâce à plusieurs radio-pharmaceutiques commerciaux (récemment Zevalin et Bexxar pour la RIT).

En France, les forces se localisent à Paris, Strasbourg, Grenoble, Clermont-Ferrand, et en particulier à Nantes, avec le lancement du cyclotron Arronax, qui permettra de produire et d'étudier le potentiel de radioéléments innovants (émetteurs alpha).

### Techniques ultrasonores

Les techniques ultrasonores semblent appelées à jouer un rôle dans le domaine de la thérapie. Le domaine, mettant en œuvre plusieurs modalités d'action de l'énergie ultrasonore, est en pleine émergence. Connues depuis une vingtaine d'années, les possibilités thérapeutiques des ultrasons focalisés de haute intensité [HIFU] pour détruire les tissus par

chauffage sont devenues une réalité clinique depuis quelques années, pour le traitement de l'adénome ou du cancer de la prostate, du fibrome utérin, des tumeurs du foie ou de la thyroïde. De nombreuses applications cliniques, principalement en cancérologie, sont l'objet de recherches actives, comme le traitement par voie endo-luminale des tumeurs des voies digestives ou des voies biliaires, et tout particulièrement le traitement de tumeurs cérébrales. L'acceptation en clinique de ces approches dépendra de l'efficacité et de la sécurité des traitements et nécessite le développement de sources ultrasonores adaptées, de méthodes fiables de focalisation du dépôt de l'énergie (particulièrement cruciales pour passer la barrière crânienne), de méthodes de contrôle de l'élévation de température et la planification du traitement (thermométrie IRM ou ultrasonore, correction des mouvements).

L'utilisation des agents de contraste ultrasonores offre également de nouvelles pistes thérapeutiques. Des micro-bulles, ciblées et chargées avec un agent thérapeutique, sont développées comme vecteurs thérapeutiques. Leur accumulation au niveau de l'emplacement cible peut être suivie par échographie, et leur destruction (cavitation), assurée par ultrasons de puissance, peut libérer localement le matériel thérapeutique, évitant de ce fait, les effets secondaires liés à l'administration systémique de chimiothérapies. Enfin citons les espoirs suscités par : (a) la sonoporation pour le transport de gènes ou de molécules thérapeutiques, ou pour l'ouverture de la barrière hémato-encéphalique et (b) les effets des ultrasons de faible puissance (LIPUS) dans la potentialisation de chimiothérapies ou la stimulation de la croissance et différenciation cellulaire (application à la réparation de différents tissus, os, cartilage, tendon...).

## 2.6 VERROUS ET ENJEUX

Du point de vue de l'organisation de la recherche, l'interface chimie – physique – biologie représente un défi dont les organismes

sont conscients. Les groupements de recherche « GDR » et les programmes collaboratifs financés par l'ANR représentent des outils précieux dans cette optique.

Au niveau français, on constate cependant que peu d'équipes structurées et reconnues sont impliquées dans le domaine des nano-objets pour le bio-médicament et les thérapies innovantes. En dehors de quelques équipes, les recherches se réalisent de manière éclatée sur le territoire par des petits groupes au sein d'équipes. Ceci peut s'expliquer par la nécessaire interface entre disciplines (physique, chimie, biologie, voire toxicologie) et par certains verrous encore importants.

Les verrous majeurs des « nano-biotechnologies » incluent :

- les procédés de synthèse ;
- la connaissance de l'impact des nano-objets sur la santé et l'environnement ;
- l'acceptation par la population des systèmes « nano », et particulièrement pour des applications thérapeutiques ; il est important que les chercheurs apportent des preuves solides de l'innocuité des constructions qu'ils génèrent et s'entourent de toutes les précautions possibles ; le sentiment de risque a été exacerbé par certains ouvrages à caractère futuriste et par des annonces abusives de certains chercheurs.

Les évolutions souhaitées dans le domaine des nanotechnologies, incluent notamment la traçabilité pour renforcer la confiance entre partenaires, des études d'éco-toxicité (anticipation des effets des nano-objets sur les écosystèmes et l'être humain) et le respect des lois sur l'éthique (expérimentation humaine, expérimentation animale, informatique et libertés, etc.).

### Verrous spécifiques

Dans les domaines de la thérapie génique, de la thérapie cellulaire et de la chirurgie de l'ARN et de l'ADN, le principal défi concerne l'administration des objets thérapeutiques par

des vecteurs ou des nano-objets, la « bio-disponibilité » des objets thérapeutiques. Un second défi porte sur le contrôle de la réponse immunitaire du patient contre les vecteurs de thérapie génique, les protéines thérapeutiques produites à partir des gènes administrés, ou encore les cellules pour la réparation tissulaire. Enfin, un troisième défi concerne le risque *d'oncogénèse insertionnelle*, c'est-à-dire la transformation tumorale de certaines cellules corrigées génétiquement, problème qui ne se pose que dans certains tissus à croissance rapide telle que la moelle osseuse, et pour lequel des stratégies sont actuellement étudiées.

Si la radio-immunothérapie a démontré ces dernières années son bénéfice par rapport à la chimiothérapie en hématologie pour le traitement des tumeurs radio-sensibles (lymphomes), les défis actuels se situent dans :

- l'optimisation par une détermination rationnelle du meilleur compromis entre efficacité et toxicité,

- le traitement des cancers disséminés et tumeurs solides métastatiques radio-résistantes,

- la prise en charge des patients à des stades précoces de la maladie ou de récurrence,

- l'élaboration de stratégies innovantes en consolidation d'autres traitements (chimiothérapie).

La levée de ces verrous sera aidée en grande partie par les avancées dans le domaine de la dosimétrie et de la radiobiologie, de l'exploitation de nouveaux radio-nucléides, et des approches multimodales incluant les méthodes d'imagerie clinique (en particulier la radio-immunothérapie). D'autres avancées sont à espérer de l'utilisation d'anticorps monoclonaux multi-spécifiques, d'haptènes, de systèmes de ciblage (par exemple avec la technique « *Affinity Enhancement System* », AES), et de vectorisation, en cours d'études actuellement.

En ce qui concerne l'immunothérapie, en dépit de résultats bénéfiques indéniables, toute modification du fonctionnement du système immunitaire peut conduire également à des effets adverses redoutables. De fait, le principal

problème de l'immunothérapie reste globalement la difficulté à modifier de façon précise le fonctionnement du système immunitaire. C'est donc dans l'optimisation des effets thérapeutiques et dans la diminution des effets adverses que résident les futurs challenges des immunothérapies du futur. Face aux potentialités énormes de développement de ces nouveaux traitements, il apparaît crucial de développer une recherche fondamentale qui aborde les mécanismes moléculaires et cellulaires de l'ensemble des acteurs du système immunitaire et définisse les éléments moléculaires clés qui constitueront autant de cibles d'intervention très spécifique et efficace.

Les modes d'actions des thérapies assistées par ultrasons (avec ou sans agents de contraste) sont encore bien mal élucidés et nécessitent de porter l'effort sur des recherches amonts, faisant intervenir physiciens, chimistes et biologistes, avant d'envisager leur transfert en clinique. Les recherches menées en France dans ces domaines sont le fait d'équipes bien structurées et compétitives, mais de petites tailles et très peu nombreuses donnant une taille critique à l'échelle nationale relativement réduite.

### 3 – IMAGERIE BIOMÉDICALE IN VIVO

L'imagerie est désormais incontournable pour accéder, par une observation *in vivo* ou *in vitro* à haute résolution, à une meilleure compréhension du fonctionnement de l'organisme vivant, ainsi qu'à une meilleure connaissance de la physiologie et des pathologies humaines. Elle est indispensable aussi bien en clinique qu'en recherche fondamentale.

Actuellement, les applications principales de l'imagerie biomédicale sont le **diagnostic médical** et le **suiti thérapeutique**. Ce domaine englobe aussi l'**exploration sur modèles animaux** (essentiellement le ron-

geur et à un degré moindre le primate) de mécanismes biologiques ou physiopathologiques humains. Ainsi, l'imagerie *in vivo* du petit animal est en plein essor dans les applications pharmacologiques (essais pré-cliniques) ou post-génomiques intégratives. Toutefois le changement d'échelle entre l'animal et l'homme représente généralement une contrainte technologique importante.

Les développements les plus récents privilégient donc **les approches non-invasives et les mesures quantitatives des paramètres biologiques directement chez l'homme.**

### 3.1 LES GRANDS DOMAINES APPLICATIFS

Les domaines d'application de l'imagerie pratiquée sur l'homme et l'animal sont très vastes : physiologie, physiopathologie (avec l'implication de quasiment toutes les disciplines médicale : neurologie, cardiologie, cancérologie, rhumatologie, hépato-gastro-entérologie, pneumologie, réadaptation fonctionnelle...), biologie du développement, pharmacologie pré-clinique et clinique... L'imagerie *in vivo* recouvre plusieurs niveaux d'exploration de l'organisme :

– ***l'imagerie anatomique ou morphologique*** représente la structure et la forme des organes et de leurs lésions, le contraste étant basé sur les caractéristiques intrinsèques des tissus ou l'injection d'agents de contraste ;

– ***l'imagerie fonctionnelle*** visualise la fonction des organes (y compris la fonction cognitive) en faisant apparaître soit leur mouvement, soit des modifications de contraste d'origine physiologique (hémodynamiques, électriques, magnétiques...);

– ***l'imagerie métabolique*** décrit le fonctionnement ou dysfonctionnement des organes au moyen d'informations biochimiques spécifiques fournies par des traceurs ou par des mesures spectroscopiques ;

– ***l'imagerie moléculaire*** est un domaine en émergence qui vise à mettre en évidence une situation pathologique ou l'effet d'un médicament au niveau de la molécule ou de la cellule, grâce à l'emploi de marqueurs spécifiques. Dernière née des modalités d'imagerie, l'imagerie moléculaire a connue une évolution considérable ces 5 dernières années avec la création de sociétés savantes et de grands réseaux européens, l'apparition de conférences internationales qui lui sont dédiées. Un chapitre est dédié à cette modalité dans la suite, tant les développements auxquels on assiste tendent à occuper une importance majeure dans la recherche pré-clinique et clinique. En particulier, le développement de nouveaux biosenseurs spécifiques pour l'imagerie moléculaire est un enjeu à la fois de recherche mais également industriel ;

– ***l'imagerie interventionnelle*** se développe pour guider et monitorer une intervention chirurgicale effectuée avec un minimum d'effraction du corps humain (chirurgie « minimalement invasive »), ou sans aucune effraction lorsque la destruction de tissus pathologiques est également effectuée par un rayonnement (ultrasons focalisés, radiofréquences...). On assiste progressivement au rapprochement et au couplage entre méthodes physique de thérapies et imagerie, et au développement d'une instrumentation clinique dédiée (exemples : thérapies assistées par ultrasons contrôlées par échographie ou par IRM).

### 3.2 LES MODALITÉS

Les différentes modalités de l'imagerie biomédicale se déclinent dans les domaines de la physique qui offrent des caractéristiques d'interaction onde-matière appropriées au Vivant :

– ***l'imagerie par rayons X*** repose sur l'opacité partielle des tissus au rayonnement, soit pour fournir des images de projection (radiographie), soit pour calculer des images de coupe en tomodynamométrie (TDM). Le

micro-CT est un développement récent qui a permis une amélioration considérable du contraste et de la résolution spatiale des images ;

– ***l'imagerie ultrasonore*** ou échographie utilise notamment la réflexion des ondes ultrasonores ou leur diffusion à l'interface de tissus de propriétés mécaniques différentes ;

– ***l'imagerie nucléaire*** montre la distribution de traceurs radioactifs, qu'ils soient des émetteurs de photons  $\gamma$  pour la tomographie d'émission monophotonique (TEMP), ou des émetteurs de photons  $\beta^+$  pour la tomographie d'émission de positons (TEP) ;

– ***l'imagerie par résonance magnétique (IRM)*** met en jeu la spectroscopie radiofréquence pour visualiser les propriétés de magnétisme nucléaire que les composants des tissus (exemple : les molécules d'eau) développent en présence d'un champ magnétique statique très puissant.

Les quatre modalités précédentes sont celles les plus couramment utilisées dans la pratique biomédicale. Cependant il convient de considérer l'émergence d'autres modalités :

– ***la magnéto-encéphalographie (MEG) et l'électro-encéphalographie de haute résolution (EEG-HR)*** qui se basent respectivement sur la mesure des champs magnétiques et électriques engendrés par l'activité des neurones. Le grand nombre de capteurs aide à la localisation de l'origine spatiale du signal neuronal spontané ou évoqué ;

– ***l'imagerie optique*** élabore de nouveaux concepts pour s'affranchir de la forte diffusion de la lumière par les tissus, qu'il s'agisse de photons transmis au travers des tissus (transillumination), rétrodiffusés (tomographie par cohérence optique) ou émis par des sources internes (imagerie de fluorescence). De l'imagerie optique nous viennent un grand nombre de développements instrumentaux ou de nouveaux concepts émergents qui méritent d'y voir consacré un paragraphe spécial (cf. ci-dessous).

### 3.3 LES VOIES D'ÉVOLUTION

L'imagerie biomédicale connaît actuellement de très fortes évolutions qui génèrent de nouvelles questions et sollicitent des **efforts de recherche interdisciplinaire**, associant un large éventail de communautés et spécialités : physique instrumentale, électronique, informatique et traitement du signal, chimie des traceurs et agents de contraste, biologie, pharmacologie.

Les voies d'évolution prévisibles pour la prochaine décennie concerneront probablement les domaines suivants :

– l'imagerie multimodale par **combinaison instrumentale de différentes méthodes physiques** afin de combiner les forces et limiter les faiblesses des différentes modalités comme l'imagerie X-TEP, optique-RMN, EEG-RMN, MEG-RMN, ultrasons-RMN...

Les performances des imageurs actuellement disponibles commercialement ont atteint les seuils espérés, notamment en terme de résolution (du moins chez l'homme). L'élaboration de nouveaux détecteurs est un domaine qui semble désormais stabilisé. Par contre, le développement de machines hybrides multimodales, rassemblant à elles seules l'ensemble des vertus de l'imagerie, est un secteur en émergence. Bien que pas encore tranché, le bénéfice de telles machines serait d'une part, de compenser les limites de chacune des techniques d'imagerie prises séparément (en terme de résolution spatiale et temporelle, et de sensibilité), et d'autre part de pouvoir réaliser plusieurs examens simultanément sur un même site représentant un avantage certain pour le confort des patients et sur le plan économique. Cependant l'élaboration d'une telle instrumentation conservant les niveaux de performances les plus élevés, ne semble pas si immédiate. L'approche multimodale en instrumentation est également en développement dans les domaines de l'imagerie per-opératoire et des sondes implantées ou techniques d'imagerie invasives. Pour ces champs d'application, la miniaturisation des systèmes, tout en conser-

vant les performances de détection et d'ergonomie, représente des verrous et enjeux supplémentaires ;

– l'émergence de **nouveaux principes d'imagerie, par couplage de différents agents physiques, véritable imagerie multi-onde telles que les méthodes acousto-optiques ou opto-acoustiques...** ou l'utilisation de nouveaux concepts instrumentaux pour compléter le jeu d'information quantitative anatomo-fonctionnelle, ou pour contourner les verrous affectant la sensibilité, la résolution spatiale ou la résolution temporelle des explorations *in vivo* (exemple : les techniques d'hyperpolarisation en IRM permettent d'observer de très faibles concentrations de traceurs tels que le carbone-13, l'élastographie ultrasonore ou IRM permet l'obtention de cartographie des caractéristiques élastiques des tissus) ;

– l'accentuation de la dimension fonctionnelle et métabolique pour les modalités semblant initialement réservées à l'imagerie anatomique et morphologique (exemple : l'IRM est devenue une méthode de choix en neurosciences par le biais de l'IRM d'activation et de connectivité fonctionnelle permettant d'accéder au fonctionnement complexe en réseaux du cerveau) ;

– le développement de **nano-objets biocompatibles** comme **agents de contraste** ou de vectorisation dans le domaine du diagnostic, suivi longitudinal, détection d'états prépathologiques, **imagerie moléculaire**. L'utilisation de ces procédés chez l'homme reste cependant à démontrer ;

– la conception de **nouveaux capteurs**, émetteurs et récepteurs notamment par l'emploi de technologies innovantes (micro-électronique, micro/nano dispositifs électromécaniques, moyens cryogéniques, techniques de conditionnement et transmission du signal, contrôleurs temps réel de doses reçues en radiothérapie...). La **miniaturisation des capteurs** devient un facteur essentiel permettant leur intégration dans des réseaux d'acquisition parallèle à haute densité, ou leur emploi comme sondes d'imagerie locale (endoscopiques, endoluminales ou implantées) ;

– l'utilisation croissante de l'imagerie pour suivre des **actes chirurgicaux minimale-ment invasifs** ou piloter les opérations de ciblage et de vectorisation en **thérapie pharmacologique** localisée ou en thérapie cellulaire et génique ;

– l'accroissement des **moyens de production, gestion, sauvegarde, et traitement des images numériques** grâce au rapprochement des services producteurs d'images de ceux qui sont spécialistes de leur post-traitement. Cette évolution inclut le développement de **protocoles d'imagerie quantitatifs** (paramètres morphologiques, fonctionnels, physio-pathologiques ou moléculaires), de conceptions assistées par ordinateurs avec auto-apprentissage (*knowledge based*), d'outils de **fusion d'images**, et surtout de **modélisation** appropriés aux différents types d'investigations. Les techniques de traitement d'images restent indispensables pour l'aide à la définition et qualité des images ainsi qu'aux processus de quantification qui sont primordiaux pour interpréter les processus biologiques d'intérêt, et simuler *in silico* l'évolution d'une pathologie ou l'action d'une thérapie afin de mieux planifier un traitement. La sophistication de plus en plus grande des imageurs, qu'ils soient mono- ou multimodes, entraîne a fortiori des développements mathématiques et informatiques conséquents. Ceci implique 1) la mise en œuvre de nouvelles grilles de calcul, 2) la conception et le développement de nouveaux algorithmes pour la reconstruction, l'exploitation et l'analyse d'images, 3) la construction de modèles numériques des systèmes d'imagerie et du vivant. La prise en compte dans les procédés de calculs, des processus physiologiques inhérents (respiration, mouvements cardiaques...), (corrections de mouvement) est un enjeu important. Il est également primordial dans ce domaine de constituer et exploiter des grandes bases de données d'imagerie renseignées (images segmentées par un ou plusieurs experts par exemple), incluant à la fois des données obtenues dans des populations saines et pathologiques, et de pouvoir intégrer des données de l'imagerie avec d'autres données biologiques (comme

des mesures électrophysiologiques par EEG, ECG, EMG, EOG...);

– la **fusion au sein d'un même dispositif de fonctionnalités diagnostiques et thérapeutiques** comme les thérapies assistées par ultrasons, le couplage ultrasons focalisés de haute intensité-IRM, radiofréquence, laser opérationnels en bloc opératoire

– le couplage des données de l'imagerie à des modèles prédictifs permettant l'avènement de **modèles diagnostiques individualisés patient-spécifiques** (exemple: prédiction personnalisée du risque de fracture à partir de reconstruction 3-D d'une partie du squelette et par couplage aux modélisations par éléments finis);

– la prise en compte accrue des **facteurs de risque** et des problèmes de compatibilité et de sécurité propres à l'imagerie biomédicale, qui seront confrontés au durcissement de la **réglementation européenne**. Exemple: primauté aux techniques non-irradiantes, la réduction de l'irradiation des patients et des personnels en radiologie et médecine nucléaire nécessitent des innovations technologiques.

### 3.4 CONCLUSIONS

L'imagerie biomédicale est au cœur de recherches fondamentalement pluridisciplinaires où sont associées autour d'un même projet différentes communautés: des biologistes ou des cliniciens qui définissent les objectifs, des chimistes qui développent des agents de contraste, des biochimistes qui les rendent biocompatibles, des physiciens qui développent des outils (instrumentation, traitement du signal) et des concepts innovants permettant la quantification de nouveaux paramètres pertinents *in vivo* de façon non-invasive et des informaticiens/mathématiciens qui mettent en œuvre des méthodes d'analyse du signal ou de l'image. Ces compétences doivent continuer à être développées au sein de la section 30 résolument pluridisciplinaire.

### Atouts/faiblesses

La communauté, constituée d'équipes d'excellent niveau sur le plan européen et international est relativement bien organisée, bénéficiant de l'effet structurant des GDR, des plateformes, des unités de recherche fondamentales implantées sur site hospitalier, de la participation aux grands réseaux d'excellence européens. On retrouve à l'échelle nationale des plateaux de niveau européen en imagerie biomédicale (amont, pré-clinique, clinique). Cependant, le leadership au niveau des grands projets européens reste encore à améliorer. L'institut Thématique Multi-organisme «Technologie pour la Santé» avec une vision nationale devrait devenir un interlocuteur privilégié pour la stratégie et l'émergence d'un véritable leadership international.

## 3.5 CAS DE L'IMAGERIE MOLÉCULAIRE

L'imagerie moléculaire est définie comme dérivant de l'imagerie nucléaire à travers le développement de molécules traceuses pour un nombre croissant de modalités. Elle regroupe principalement la TEP, la TEMP, l'imagerie par spectroscopie de RMN et l'imagerie optique utilisant comme marqueurs les radiosotopes émetteurs de positons ou gamma, les isotopes magnétiques (carbone-13) et les fluorophores. L'imagerie ultrasonore n'est cependant pas en reste, et on voit se développer des sondes moléculaires à base d'agents de contraste ultrasonore (nano ou micro bulles marquées).

L'imagerie moléculaire joue un rôle clé dans les grands domaines de la santé qui sont: le cancer, les maladies cardiovasculaires (AVC, ischémie) et les cardiomyopathies, les maladies neurologiques (démences, dépression, épilepsie, schizophrénie), l'inflammation (SEP) et l'infection (lupus). Elle est fondamentale par exemple pour 1) identifier un foyer cancéreux, 2) suivre une progression ou régression tumorale dans un contexte thérapeutique,

3) visualiser les pertes fonctionnelles ou suivre la régénération des tissus ou les organes lésés, 4) évaluer les effets du vieillissement en regardant les altérations physiologiques des fonctions physiologiques, 5) mettre en évidence une situation pathologique ou l'effet d'un médicament grâce à l'emploi de marqueurs spécifiques. L'objectif final est dans tous les cas, d'aider à l'orientation thérapeutique, d'établir un diagnostic le plus précoce possible dans des conditions minimalement invasives, et d'étudier de nouvelles approches thérapeutiques afin d'améliorer l'efficacité des traitements et la prise en charge des malades. L'imagerie moléculaire a été étendue à l'imagerie per-opératoire, elle aussi basée principalement sur la détection radioactive et/ou optique, et qui a pour but de renforcer l'efficacité des techniques interventionnelles chirurgicales (dans le cadre de tumeurs solides plus particulièrement).

Au cours de la dernière décennie, on a pu assister à la multiplication des imageurs (TEP, SPECT, IRM) dans les hôpitaux, à une implantation massive des cyclotrons médicaux dans tout le territoire, ainsi qu'à une explosion du développement de l'imagerie optique à l'échelle microscopique et macroscopique, *in vitro* et *in vivo* (bioluminescence, fluorescence) en pré-clinique et en imagerie interventionnelle.

Les domaines liés à l'imagerie moléculaire relèvent de plusieurs champs technologiques principaux, plus ou moins indépendants, et représentatifs de la section 30 :

- les systèmes de détection ;
- le traitement informatique des signaux et des images (incluant la construction de modèles physiques et biologiques) ;
- les agents d'imagerie ou de contraste (traceurs, biosenseurs) ;
- les modèles animaux translationnels.

## Recherche en imagerie moléculaire

La recherche en imagerie moléculaire se décline en une recherche pluridisciplinaire comprenant des développements instrumen-

taux, l'élaboration de techniques de reconstruction et d'analyse d'images, des études de modélisation, et la mise au point de traceurs et leur utilisation en clinique et pré-clinique :

– la mise au point de modèles peut être un facteur déterminant pour la définition des images. Le domaine de la modélisation est un terrain déjà bien débrouillé, et l'évolution des modèles ces dernières années n'est pas significative. Des modifications significatives peuvent être nécessaires dans le cas d'une nouvelle validation de traceur. Les verrous dans la problématique de modélisation concernent plus particulièrement les études avec utilisation de multi-traceurs. Par ailleurs, en termes d'optimisation de modélisation, la prise en compte de modèles de patients dans le cadre des simulateurs d'imageurs (simulations de détecteurs à semi-conducteurs), représente un enjeu futur. De manière générale, la modélisation des processus physiologiques, au niveau cellulaire ou de l'organe, reste un domaine embryonnaire ;

– le développement de l'imagerie moléculaire reste lié à celui du traceur, la rendant ainsi complètement dépendante de la chimie/radiochimie/nanochimie et de l'accessibilité aux radioisotopes, contrastophores, fluorophores, nano ou micro-bulles et autres marqueurs. De nombreuses cibles moléculaires n'ont pas encore leurs sondes appropriées, notamment pour l'exploration *in vivo*, soit pour manque de ciblage spécifique, de métabolisme *in vivo*, de pharmacocinétique inappropriée, ou alors par manque de connaissance des sites de liaisons potentiels et de ligands « *lead* ». Les enjeux, comme toujours dans ce domaine, restent l'élaboration, l'administration en toute innocuité, la validation pré-clinique et clinique de marqueurs spécifiques, déclinés en radio-traceurs, sondes chimiques et agents de contraste ciblés ou non. La préparation de radioisotopes GMP appropriés pour l'imagerie radioactive par des systèmes type générateurs (indépendamment de cyclotrons) ainsi que la toxicité potentielle des sondes issues des nanosciences, constituent des verrous importants à l'heure actuelle.

Mise en garde : **Toxicologie des outils chimiques utilisés (notamment les nanoparticules)**

## Enjeux et verrous pour la recherche par l'imagerie moléculaire

Outre les verrous et enjeux spécifiques à chacun des domaines particuliers de recherche en imagerie, la recherche par l'imagerie moléculaire dans le domaine de la santé pose le problème des moyens techniques de réalisation du pré-clinique et son transfert à la clinique. L'approche pré-clinique par imagerie est étroitement liée à l'accessibilité à des modèles animaux pertinents. Plusieurs modèles (souris, rat) sont proposés et validés pour les « grandes » pathologies (modèles tumeurs, d'ischémie, démences, dépression, épilepsie, schizophrénie, inflammation et infection), même si aucun d'entre eux n'est complet. Par ailleurs, l'imagerie moléculaire chez l'animal éveillé, reproduisant les conditions d'investigation chez l'humain, c'est-à-dire sans anesthésie ou simultanément à des analyses comportementales pour des études en cognition, sans condition de stress, reste un enjeu primordial pour avancer dans ce domaine. Enfin, le transfert préclinique à clinique peut constituer un challenge. Ce passage peut être abordé par des études chez le primate (marmouzet, macaque, babouin), services pouvant être offerts notamment par les plateformes d'imagerie. De telles recherches, qu'elles soient en imagerie ou par l'imagerie, nécessitent un temps machines suffisant pour les équipes de recherche. Il semble que ce temps et l'accès machine soit actuellement trop restreint.

### Atouts en France/CNRS

- mise en place et structuration des plateformes d'imagerie (IBISA) ;
- participation aux réseaux européens : EMIL, DIMI, ESMI (*European Society for Molecular Imaging*), Euro-BioImaging (ESFRI) ;
- participation aux réseaux nationaux : GDR.

## 3.6 CAS DE LA BIOPHOTONIQUE

La biophotonique est l'application de l'optique et de la photonique à la biologie et à la santé. En utilisant les rayonnements visibles, ultraviolets, ou infrarouges pour l'analyse ou l'intervention thérapeutique, la biophotonique intervient essentiellement dans les secteurs de la biologie et de la santé (ophtalmologie, la dermatologie...).

L'étude des grandes fonctions cellulaires et de leurs perturbations pathologiques requiert de localiser, mesurer et quantifier en milieu vivant, à l'échelle nanoscopique et microscopique, les interactions entre molécules d'intérêts (protéines, acides nucléiques, lipides, ions). Ces mécanismes, qui conditionnent la régulation, l'homéostasie et l'intégration des fonctions cellulaires et tissulaires, sont au cœur du fonctionnement normal ou pathologique des organismes.

Les méthodes d'exploration les plus adaptées s'appuient sur les récents développements technologiques en imagerie cellulaire et tissulaire. Dans ce contexte, les stratégies de biophotonique fonctionnelle (et notamment l'imagerie de fluorescence) jouent un rôle majeur, car les techniques qui en dérivent sont à la fois spatialement résolutive et porteuses d'informations à l'échelon moléculaire tout en étant peu invasives. La biophotonique, dont les fondements physiques sont liés aux propriétés de la lumière et son interaction avec la matière vivante, a fortement modifié la compréhension du vivant au cours de ces deux dernières décennies. Elle constitue un mode majeur d'imagerie des mécanismes moléculaires sur le plan fonctionnel et structural. Elle permet ainsi de manière unique de caractériser avec une sensibilité exceptionnelle (qui peut descendre au niveau de la molécule unique) l'organisation dynamique des complexes moléculaires de l'échelle nanoscopique jusqu'aux organismes modèles. Elle permet aussi de manipuler et modifier le vivant par des outils tels les pinces optiques ou la photothérapie. De plus, elle est amenée enfin à jouer un rôle capital dans le dépistage de différentes

pathologies, notamment le cancer, par la mise en œuvre de nouvelles pistes de diagnostic. La biophotonique s'appuie sur un large spectre de disciplines (photonique et biologie, mais aussi chimie, traitement du signal, modélisation, instrumentation, optique).

Pour l'ensemble de ces applications, il existe un fort potentiel de recherche en biophotonique, dont le marché au niveau mondial est estimé à 60 milliards de dollars. Cependant, le développement de la biophotonique est aujourd'hui limité par différents verrous technologiques, dont le dépassement requiert des travaux transdisciplinaires originaux et de rupture (fondamentaux ou appliqués), afin de relever le défi des nouvelles imageries biologiques et médicales.

**Le dépassement de ces verrous nécessite :**

- des recherches et développements d'amont associant des compétences en chimie, physique, informatique, mathématique et biologie et reposant sur les récentes avancées scientifiques dans ces domaines ;

- la concrétisation de ces recherches interdisciplinaires par la mise au point de nouvelles stratégies et technologies en microscopie analytique et quantitative ;

- la création de centres ou d'Instituts spécialisés, de masse critique et de visibilité internationale, dans un nombre restreints de sites où l'ensemble des compétences peuvent être rassemblées pour mener de manière efficace ces recherches et développements interdisciplinaires ;

- la mise en œuvre de ces nouveaux outils au sein de « plates-formes d'imagerie » dotées des expertises nécessaires et assurant une large ouverture aux communautés d'utilisateurs en biologie et médecine.

Dans ce contexte, les nouveaux objectifs en imagerie biophotonique peuvent être divisés schématiquement en trois grands axes :

**a) Quantification des dynamiques et interactions moléculaires en cellule vivante à haute résolution**

Un des enjeux majeurs de la décennie sera de développer de nouveaux outils pour imager à haute résolution spatiale et temporelle les dynamiques moléculaires individuelles ou collectives. En effet, jusqu'à un passé récent, la résolution des microscopies optiques, limitée par le phénomène de diffraction, ne permettait pas d'imager des objets dont la taille est inférieure à 200 nm, dans le plan latéral et 500 nm, dans le plan axial. Depuis quelques années, de nouvelles approches ont permis d'atteindre des résolutions de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Ces efforts doivent être poursuivis pour améliorer la résolution et la vitesse d'acquisition de ces nouvelles approches afin de remplacer à terme la microscopie par la nanoscopie, qui permettra notamment de cartographier avec précision la distribution des protéines au niveau cellulaire et décortiquer de manière quantitative au niveau moléculaire, les mécanismes physiologiques qui gouvernent les fonctions du vivant. Des efforts devront également être réalisés pour développer a) de nouvelles approches pour suivre simultanément un nombre croissant de partenaires moléculaires et b) des méthodes d'imagerie sans marqueurs (telles que les techniques Raman ou de génération de seconde ou troisième harmonique) basées sur des signatures de molécules endogènes.

**b) Exploration moléculaire et fonctionnelle à l'échelle des organisations tissulaires et de l'animal entier**

Les méthodes d'imagerie cellulaire devront évoluer pour s'adapter à des degrés d'organisation plus élevés. Du fait de la faible profondeur de pénétration de la lumière dans les tissus vivants, les développements instrumentaux et méthodologiques devront être poursuivis pour l'exploration de structures de plus en plus profondes. Des progrès doivent encore être réalisés dans l'optique des fibres, les sources lumineuses, les détecteurs pour conduire à l'élaboration de méthodes originales pour l'évaluation des tissus in situ et voir le concept de biopsie optique devenir opérationnel. Des efforts devront notamment être réalisés pour miniaturiser les

équipements optiques et améliorer la télétransmission des images afin de réaliser des « nano-imageurs » pouvant être utilisés pour des explorations *in vivo* de capillaires et la destruction de tumeurs. Des sondes et notamment des nano-particules de hautes performances photophysiques et dotées de fonctions multiples, devront également être conçues pour répondre aux besoins spécifiques de l'imagerie tissulaire et *in vivo*, mais également servir d'outils diagnostiques et thérapeutiques. En outre, l'actuelle accélération du développement des connaissances, en particulier en biologie, les progrès technologiques, et l'abaissement du coût des technologies, notamment en optique, ainsi que l'accélération des vitesses de calcul créent les conditions favorables d'un développement d'imagerie multimodale associant la biophotonique à d'autres approches de microscopie (EM, TomoX, Nano SIMS...) ou d'imagerie (ultra-sonore, IRM...). Ces imageries multimodales donneront des informations multiples dont l'intégration devrait conduire à des progrès sans précédent dans la compréhension des mécanismes du vivant, mais également dans le diagnostic et la thérapeutique.

### **c) Exploitation des données multiparamétriques, analyse des données à haut débit et approche intégrative du vivant**

Les données massives d'images produites par les différentes modalités en imagerie biophotonique et leurs combinaisons, contiennent souvent plus d'informations que ce qui peut être actuellement exploité. Dans ce contexte, la caractérisation et l'interprétation de ces données requiert des progrès conséquents dans a) l'automatisation des tâches d'analyse, de l'archivage et la gestion multi-paramétrique des données afin de travailler à haut débit, b) le développements d'outils mathématiques et informatiques de modélisation des données issues de la microscopie multimodale et c) l'intégration et la confrontation de ces données à celles obtenues dans d'autres domaines (biologie structurale par exemple).

## **Positionnement de la recherche française**

La biophotonique diagnostique et interventionnelle et la biophotonique fonctionnelle du vivant représentent un vaste champ de recherche en pleine émergence faisant appel à des communautés très variées et complémentaires. La France possède des atouts certains avec d'excellentes équipes spécialisées dans les recherches amonts. Malgré le potentiel de recherches très riches que cela représente en termes de développements fondamentaux et d'applications en biologie ou en santé, on constate encore assez peu de candidatures aux concours chercheurs dans cette discipline pour la section 30 et une visibilité relativement limitée dans le domaine de la biophotonique diagnostique et interventionnelle. Il convient de susciter les candidatures par exemple 1) en affichant plus de postes au concours, 2) en favorisant le rapprochement entre la communauté des opticiens et la communauté médicale et 3) en suscitant des projets collaboratifs pour réaliser des percées technologiques fondamentales.

### **Points forts**

- communauté nationale interdisciplinaire fortement structurée et dynamique, notamment autour du GDR2588. Cette communauté est répartie dans l'ensemble des grands centres universitaires et instituts ;

- mobilisation de la communauté des physiciens et des nanosciences, ainsi que des mathématiciens et informaticiens plus récemment. La France dispose de compétences fortes dans les disciplines d'amont pouvant être mobilisées pour renforcer la biologie systémique en lien avec les apports de l'imagerie biologique ;

- existence depuis plusieurs années, d'un grand nombre d'actions de formation, d'ateliers (INSERM et CNRS), d'écoles d'été ou thématiques, dans ce domaine ;

- fort potentiel dans des technologies de rupture : couplage opto-acoustique, microscopie

pie photothermique, microscopie non-linéaire des tissus, optique adaptative en microscopie, tomographie optique cohérente, tomographique par fluorescence, microscopie plasmonique...; ainsi que dans l'analyse et le traitement d'image.

- des domaines technologiques forts avec des réalisations identifiées et une dynamique de communautés interdisciplinaires favorisant le transfert de savoir et de développement entre laboratoires;

- existence d'un large réseau de plates-formes d'imagerie en biologie, organisé (RTmfm, IBISA) facilitant l'accessibilité aux moyens technologiques classiques et nouveaux;

- initiative d'un programme de soutien à la prise de risque au CNRS, dont les objectifs sont de soutenir l'interdisciplinarité et les développements d'amont à l'interface avec les sciences du vivant, mais dont le budget est trop réduit.

### **Points faibles**

- absence d'instituts ou de centres spécialisés en biophotonique, de visibilité internationale;

- encore trop peu d'investissement des biologistes dans l'utilisation des nouvelles stratégies d'imagerie en biologie, induisant des difficultés de transfert vers de nouvelles thématiques biologiques;

- cloisonnement persistant dans l'organisation et l'évaluation des laboratoires par disciplines, ce qui entraîne des difficultés structurelles à développer l'interdisciplinarité dans des projets de moyenne durée ou des instituts avec des ambitions de plus longue durée;

- dispersion thématique et géographique se traduisant par un frein au transfert entre les biologistes et les autres disciplines sauf dans quelques sites en France;

- visibilité internationale encore réduite de la communauté française en biophotonique (sauf quelques groupes);

- problème de définition et de reconnaissance de l'activité de recherche propre des plates-formes;

- mobilisation faible de la communauté des sciences pour l'ingénieur;

- soutien trop faible à la prise de risque notamment pour des sujets amont et leurs transferts vers les applications. Besoins de financements et de modalité d'évaluation encourageant et soutenant l'émergence, la pérennisation et la qualité des équipes et laboratoires interdisciplinaires;

- déficit de formation Masters (M1 et M2) interdisciplinaires avec un problème d'école doctorale interdisciplinaire et de laboratoire d'accueil par discipline;

- nombre restreint d'industries françaises dans le domaine pouvant jouer un rôle émulateur d'innovation.

## **4 – BIO-INGÉNIERIE (BIOMÉCANIQUE, BIOMATÉRIAUX, INGÉNIERIE TISSULAIRE)**

Les recherches en Bio-Ingénierie pour la Santé (ou génie biomédical) ont pour objectifs de comprendre les structures et les fonctions du corps humain à l'échelle des grands systèmes (ostéo-articulaire, cardiovasculaire, musculaire...), des organes (os, cœur, muscle...), des tissus, des cellules et de la molécule. Ces connaissances permettent le développement d'outils de diagnostic médical (dépistage, suivi, évaluation), de stratégies innovantes de réparation tissulaire, et de prise en charge des patients.

### **4.1 BIOMÉCANIQUE**

La biomécanique, domaine interdisciplinaire situé à la frontière entre les sciences pour

l'ingénieur (notamment la mécanique) et les sciences du vivant, vise à mieux comprendre la réponse mécanique du corps humain : dans la situation physiologique, après lésions (quelles soient d'origine pathologique ou traumatique) et après restauration de la fonction. Elle contribue donc au développement d'outils d'aide au diagnostic, à l'indication thérapeutique et au suivi post-traitement. Les recherches en biomécanique associent approche expérimentale et modélisation, afin de mieux comprendre le fonctionnement du corps humain. Les recherches en biomécanique vont par conséquent consister à comprendre et modéliser les grands systèmes (ostéo-articulaire, cardio-vasculaire...) à différentes échelles, macro et microscopiques, pour concevoir des prothèses et implants optimisés et évaluer leur tolérance et fonctionnalité à long terme. À l'échelon cellulaire, ces recherches s'intéressent également aux biopolymères, au cytosquelette et à la membrane et à ses récepteurs mécano-sensibles. Les nouvelles connaissances en biomécanique des tissus (os, ligament, cartilage, muscle, vaisseaux...) sont indispensables pour contribuer à la définition du cahier des charges de nouveaux biomatériaux et de produits issus de l'ingénierie tissulaire. La biomécanique est également un élément clef dans l'évaluation de ces produits de remplacement des tissus avant et après leur implantation dans le corps humain. La modélisation complète définissant les lois de comportement des tissus biologiques et leur évolution dans le temps permettront de cerner leurs interactions avec les implants. Ces lois restent méconnues et constituent un domaine de recherche d'avenir. Les enjeux actuels sont une meilleure analyse du vivant. En effet, les méthodes développées *ex vivo* apportent des connaissances fondamentales, mais limitées sur le comportement du corps humain. En particulier, la variabilité des propriétés mécaniques ne peuvent être appréhendées complètement que par des mesures *in vivo*. Pour lever de tels verrous, la pluridisciplinarité doit être encore renforcée, avec notamment des liens indispensables entre biomécanique et imagerie biomédicale *in vivo*. Les techniques de traitement de signal et de modélisation numérique multi-

échelle couplées avec l'imagerie multi-échelle permettront d'acquérir des informations sur les propriétés géométriques, mécaniques et métaboliques des organes.

Les points forts sont :

- formations de Master (à l'attention des étudiants des sciences pour l'ingénieur et des sciences de la vie) et doctorale reconnue au niveau européen et international ;

- implication importante dans les projets européens (PCRDT) et réseaux d'excellence, au moins dans certains domaines ;

- qualité des recherches en biomécanique et des équipes cliniques françaises, offrant un potentiel exceptionnel ;

Les points faibles :

- manque de reconnaissance de la discipline de la part des organismes français, alors qu'elle est clairement identifiée à l'internationale. Du fait de la pluridisciplinarité, une reconnaissance des centres d'excellence par l'Alliance AVIESAN et l'ITMO technologie pour la santé pourrait être une option efficace.

- structuration de la recherche à l'échelle nationale encore perfectible malgré l'existence de GDR et de la Société de Biomécanique (société internationale de langue française).

- recrutements timides sur des profils biomécaniques via les organismes de recherche français

- visibilité internationale encore limitée des équipes de recherche françaises liée, en partie, à un manque de moyens humains.

## 4.2 BIOMATÉRIAUX

Les biomatériaux sont conçus pour être en contact avec le vivant, pour remplacer les tissus ou pallier les systèmes déficients : lentilles correctrices, matériel de comblement ou de substitution osseuse pour des applications en chirurgie maxillo-faciale ou orthopédie, pro-

thèses articulaires, valves cardiaques et prothèses vasculaires, *stents* fonctionnalisés, rein artificiel, pompes implantables et systèmes de libération des médicaments, biocapteurs, matériaux et implants pour chirurgie esthétique, colles chirurgicales, drains, produits pour radiologie interventionnelle... Le devenir à moyen et long terme de ces prothèses et implants dépend de plusieurs paramètres : le site d'implantation, l'interaction avec le tissu biologique natif et les cellules (bio-intégration et bio-fonctionnalité), et sa conception mécanique (matériaux et géométrie). À l'échelle tissulaire, les interactions à l'interface des tissus biologiques, des cellules et de l'implant restent souvent méconnues, alors qu'elle conditionne son devenir à long terme. Afin d'appréhender ces connaissances, les recherches expérimentales *in vivo* sont nécessaires, auxquelles succéderont des essais cliniques qui nécessitent au minimum dix à vingt années de suivi. À l'échelle macroscopique, l'impact des forces dynamiques *in vivo* sur le remodelage, l'endommagement, le vieillissement des tissus biologiques conditionne également le devenir de la prothèse à long terme, et ces données restent méconnues.

### 4.3 INGÉNIERIE TISSULAIRE

L'ingénierie tissulaire, au carrefour des sciences du vivant et des sciences de l'ingénieur, a pour but de remplacer, maintenir ou améliorer la fonction de tissus humains, grâce à des substituts tissulaires incluant des éléments vivants. Il s'agit donc d'élaborer des tissus artificiels, en utilisant (isolément ou en association) des cellules de préférence autologues (issues du patient), des matrices (*scaffold*) et des facteurs bioactifs dans un environnement mécanique adapté (bio-réacteur). Leur association produit un biomatériau hybride qui réunit des composés biologiques (cellules, facteurs de croissance, ou protéines d'adhésion) et des biomatériaux (polymères, céramiques, gels) éventuellement fonctionnalisés. Dans certaines approches, cette matrice est ense-

mencée avec des cellules (expansion préalable) en présence de facteurs de croissance dans un milieu de culture au sein d'un bioréacteur. Par la suite, le tissu résultant peut être implanté. Une alternative est de stimuler directement la réparation tissulaire au sein de l'organe lésé en y vectorisant un biomatériau et éventuellement en activant à distance (chaleur, lumière, champ magnétique...) le facteur bioactif associé ou les cellules implantées.

Les applications sont larges, intéressant aussi bien la peau que le foie ou la cornée, mais également les vaisseaux et l'appareil locomoteur (os, cartilage ou tendons). L'origine des cellules est un facteur déterminant dans la formation, le devenir et la biocompatibilité du tissu néo-construit. Cette technologie fait appel aux cultures de cellules autologues (cellules différenciées, ou plus souvent des cellules souches principalement des cellules adultes de différentes sources, l'utilisation de cellules embryonnaires ou des cellules souches pluripotentes ou totipotentes induites restant encore à ce jour au niveau expérimental), à des biomatériaux (matériaux poreux à architecture contrôlée, éponges, gels, fibres tissées, ciments), à des facteurs de croissance (TGF, BMP...). Expérimentalement, la thérapie génique (notamment en utilisant des cellules-souches transfectées) permet de mieux comprendre et guider la différenciation cellulaire. Il reste alors aux cellules d'interagir avec le biomatériau et le milieu environnant pour s'organiser, former un néo-tissu spécifique, voir un organe. Ces interactions restent à déchiffrer car les réponses et le devenir des cellules implantées dans le tissu natif restent méconnus. Les contraintes électro-physico-chimiques *in situ* vont interagir sur les cellules. Les adaptations cellulaires peuvent alors être différentes (prolifération, différenciation) et peuvent être appréhendées par des méthodes de « cell tracking » couplées à une imagerie adaptée (IRM, PET, luminescence...).

L'ingénierie tissulaire et la stimulation de la régénération tissulaire sont en plein essor sur le plan expérimental, et les applications cliniques sont de plus en plus nombreuses. Elles devraient se développer au niveau indus-

triel compte tenu du potentiel important de ces biotechnologies.

## **Positionnement de la recherche française en ingénierie tissulaire**

Une nouvelle discipline biomédicale, appelée médecine régénératrice, se développe et son attractivité se renforce auprès des chercheurs et des praticiens. L'ingénierie tissulaire peut bénéficier des apports sur les thérapies cellulaires hématopoïétiques qui ont montré leur efficacité dans de nombreuses pathologies malignes et non malignes. En revanche, c'est encore rarement le cas des thérapies cellulaires non hématopoïétiques rendant l'approche par ingénierie cellulaire et tissulaire encore plus complexe. Toutefois, les stratégies d'ingénierie tissulaire sont susceptibles de s'adresser à de très nombreux malades atteints de pathologies variées telles que les cardiopathies, le diabète, certains cancers, les atteintes ostéo-articulaires, les maladies neurodégénératives... Dans ces domaines, les applications cliniques potentielles des cellules souches mésenchymateuses (CSM) sont nombreuses. Que ce soit pour les produits de thérapie cellulaire ou tissulaire (cornée, os, peau...), on a maintenant de nouvelles définitions et normes européennes sur le plan de la qualité et de la sécurité cliniques.

La majorité des sociétés de thérapie cellulaire/tissulaire se situe aux USA. La France est à la troisième place européenne, derrière l'Allemagne et le Royaume Uni et principalement pour des utilisations in vitro.

### **Points forts**

– La France possède des compétences multidisciplinaires reconnues dans le monde et des scientifiques de haut niveau dans des domaines de la biologie liée à la thérapie cellulaire et aux biomatériaux :

a) génétique et biologie moléculaire

b) biologie du développement, Biologie cellulaire et Immunologie

c) chimie des polymères, Biomécanique et Bio-réacteurs, Ingénierie Chimique ;

– des centres scientifiques d'un niveau international commencent à percer en France

– les développements cliniques actuels se concentrent sur des niches thérapeutiques pour lesquelles des compétences importantes sont disponibles dans le pays comme les modèles pour l'étude de la chorée de Huntington, avec une extension possible vers la maladie de Parkinson, le protocole thérapeutique de prise en charge de l'immunodéficience sévère liée à l'X ou l'immunothérapie de type CTL antivirus.

– problèmes éthiques limités avec certaines cellules comme celles de la gelée de Wharton, du placenta, car le don est généralement encadré par un système de consentement éclairé

– un cadre réglementaire permet aux scientifiques d'explorer toutes les voies de recherche possibles, afin d'augmenter les connaissances utiles sur les cellules souches et la thérapie cellulaire (Décret de 2007 sur l'utilisation des produits du corps humain)

### **Points faibles**

– le nombre de publications françaises dans le domaine est en croissance continue depuis 2002, mais reste faible par rapport à d'autres pays dans le monde ;

– il y a un manque de financements publics en France dans la thérapie cellulaire et l'ingénierie tissulaire ;

– l'association des multiples disciplines en l'ingénierie tissulaire est à un stade très précoce ;

– l'implication est faible des groupes pharmaceutiques, et très faible pour le secteur privé lié au domaine ;

– la thérapie cellulaire réclame une haute technologie, et par conséquent est chère ;

– les produits sont souvent des procédés plus que des médicaments au sens propre ;

– des incertitudes persistent sur la propriété intellectuelle, principalement dues à la com-

plexité intrinsèque des procédés, ce qui complique la prise de brevets ;

– les acteurs industriels sont réticents à investir lourdement dans le secteur par crainte d'une trop longue période avant un retour sur investissement.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions les personnes suivantes pour leurs commentaires et suggestions :

– Patrick COZZONE, PU-PH Université de la Méditerranée

– Antoine KICHLER, DR CNRS SECTION 30

– Didier LETOURNEUR, DR CNRS SECTION 30

– David MITTON, DR INRETS

– Sylvianne MULLER, DR CNRS SECTION 30

– Pascal SOMMER, DR CNRS SECTION 30

– Jean-françois STOLTZ, PUPH Université Nancy



## HOMMES ET MILIEUX : ÉVOLUTION, INTERACTIONS

*Président*

Didier BINDER

*Membres de la section*

Rose-Marie ARBOGAST

François BON

Albane BURENS-CAROZZA

Michèle CASANOVA

Marianne CHRISTENSEN

Éric CRUBEZY

Didier GALOP

Jean-Pierre GIRAUD

Dominique GRIMAUD-HERVÉ

Anne-Marie GUIHARD-COSTA

Yannick LAGEAT

Catherine LOUBOUTIN

Bruno MAUREILLE

Jean-Luc PEIRY

Grégory PEREIRA

Martine REGERT

Valentine ROUX

Dominique TROUSSON

Alain TURQ

Julia WATTEZ

### PRÉAMBULE

Ce rapport de conjoncture a été commandé à la section dans un contexte en profonde mutation avec la création des instituts du CNRS. Cette dernière a généré des débats très riches au sein d'une communauté qui s'est formée sur le terrain et dans les laboratoires autour d'objets de recherche observés conjointement et interactivement avec des méthodes empruntées aux Sciences de l'Homme et de la Société, aux Sciences de la Vie et de la Terre, à la Physique et à la Chimie.

Les postures interdisciplinaires de l'INEE et les outils qu'il met en œuvre, semblent appropriées pour rendre compte de la complexité des objets étudiés par la section, qu'ils soient humains, sociaux ou environnementaux. Dans ce sens la section 31 s'identifie de façon claire et volontariste comme une interface de l'INSHS et de l'INEE.

# 1 – PÉRIMÈTRE & POSITIONNEMENT GÉNÉRAL

## 1.1 CONTOURS DISCIPLINAIRES

La section 31 regroupe trois disciplines principales : la Préhistoire-Protohistoire, l'Anthropologie biologique et la Géographie environnementale.

Parmi les biologistes, les géologues, les chimistes et les physiciens dont les thèmes de recherche relèvent de la section 31 et qui lui sont de ce fait rattachés, certains font l'objet d'une double évaluation par les sections du Comité national.

Les Sciences des environnements passés constituent un groupe disciplinaire spécifique extrêmement dynamique. En revanche, leur démarcation vis-à-vis d'autres sections du Comité national – sections 20 et 29 – est subtile, car liée davantage aux objets qu'aux méthodes d'étude : pour la section 31, il n'est pas d'environnement sans hommes.

Abstraction faite de la Géographie environnementale, toutes les disciplines de la section se caractérisent par un très faible ancrage universitaire et par un nombre limité d'enseignants-chercheurs. L'absence de formation de formateurs (CAPÈS-Agrégation) est l'une des causes de leur faible poids au sein du dispositif universitaire et justifie, symétriquement, le rôle crucial joué par le CNRS pour leur développement. Cette situation pourrait connaître une forte aggravation avec la réforme de la formation des maîtres et la mise en place de parcours de Master spécifiquement dédiés à la préparation des concours. Pour la plupart des disciplines « non-à-concours » de la section, le risque d'un tarissement des filières M2-recherche et au-delà du Doctorat, est extrêmement élevé. En outre on peut craindre que la part réservée à la Géographie environnementale dans la préparation des concours soit elle-même progressivement réduite.

Les liens avec les sections du CNU concernées (1) sont divers et seront explicités *infra*. Ils confirment le caractère fortement interdisciplinaire de la section.

## 1.2 THÉMATIQUES

La section 31 a deux principaux objets d'étude : (i) l'évolution et la diversité de l'Homme et de ses pratiques sociales dans son milieu physique depuis le Pliocène et (ii) l'évolution et la diversité des milieux, sous forçages anthropique et climatique. Elle s'intéresse ainsi de manière centrale aux indicateurs et déterminants biologiques, culturels et environnementaux de la diversité humaine dans le temps et dans l'espace.

Ces questions sont aujourd'hui cruciales en regard d'enjeux sociétaux actuels tels que, par exemple, la mixité et les mobilités populationnelles, les évolutions démographiques, les identités culturelles et les inter-culturalités dans leur dimension historique, l'adaptabilité au changement climatique et environnemental ou encore la construction de la « nature » comme objet patrimonial.

Ces problématiques sont déclinées à travers des champs spécifiques et plusieurs axes transversaux développés *infra* (§ 2 et *sq.*).

Les trois principaux champs spécifiques concernent (i) L'Homme : évolution, diversité biologique, du Pliocène à l'Actuel ; (ii) Les sociétés préhistoriques et protohistoriques : évolution et diversité des comportements et des pratiques culturelles ; (iii) L'évolution et la diversité des cadres physiques de l'activité humaine, du Pliocène à l'Actuel.

Les approches transversales qui caractérisent les pratiques de recherche de cette section se fondent sur l'exploitation de référentiels actualistes. Il en est ainsi, par exemple de : l'archéo-thanatologie, les archéo-matériaux, la bio-archéologie et les comportements de subsistance, les coévolutions hommes-sociétés-milieux, la datation, l'ethnoarchéologie, l'his-

toire des peuplements, la taphonomie... Toutes ne sont pas développées ci-dessous.

La pertinence et la cohésion de la section 31 s'expriment également au niveau des pratiques scientifiques sur le terrain : c'est notamment autour du constat d'unicité des archives paléontologiques et paléo-environnementales que cette communauté s'est construite et s'est développée dans un contexte interdisciplinaire à travers une approche systémique et multi-scalaire.

### 1.3 TERRAINS ET PARTENARIATS

Les recherches conduites par les laboratoires et les membres de la section concernent l'ensemble des aires culturelles et les cinq continents. Elles sont portées par un réseau associant au CNRS et aux universités la plupart des acteurs institutionnels majeurs de la recherche et du développement.

Sur les terrains métropolitains, les partenariats avec le Ministère de la Culture et de la Communication et l'INRAP sont structurants et donnent lieu à des conventions voire à des contractualisations. Ces dernières permettent d'offrir à une part importante des acteurs intéressés aux problématiques de la section un contexte de recherche et des plates-formes techniques et documentaires. De nombreuses collectivités territoriales s'associent à cette dynamique à travers des conventions de partenariat particulièrement fécondes. D'autres établissements publics (CEMAGREF, CIRAD, EHESS, EPHE, EFS, INED, Musées, Parcs naturels) sont conventionnés ou, plus rarement, cocontractants des UMR au sein desquelles ils affectent des personnels permanents.

Sur les terrains extra-métropolitains, les liens sont forts avec le ministère des Affaires Étrangères et Européennes (Écoles françaises, UMIFRES) et avec l'IRD et dont les rôles restent essentiels pour le financement des missions de recherche.

À la suite du rapport d'Aubert, la réduction à 2 du nombre des institutions susceptibles

de constituer les tutelles des UMR pourra s'avérer pénalisante pour la visibilité des partenariats et pour celle des chercheurs appartenant à des organismes autres que le CNRS.

## 1.4 ACTEURS ET DÉMOGRAPHIE

### Les chercheurs

Les unités de la section 31 développent une véritable culture de laboratoire qui se manifeste notamment par l'intégration aux UMR de la plupart des enseignants chercheurs des champs disciplinaires concernés : ainsi la quasi-totalité des PR et MCF anthropologues biologistes, des pré- et protohistoriens et paléo-environnementalistes dépendant de la section CNU20 (n=43/47) appartiennent à des UMR CNRS (2).

Au 31 décembre 2009, la section 31 regroupait 241 chercheurs CNRS. Leur répartition par grands champs disciplinaires est la suivante :

- 42 anthropobiologistes *sensu lato* (dont 2 recrutés fin 2009) soit 18 %

- 94 chercheurs en sciences de la vie, de la terre ou en sciences physiques et chimiques et géographes (dont 3 recrutés fin 2009) soit 39 %.

- 104 préhistoriens et protohistoriens (dont 4 recrutés fin 2009) soit 43 %

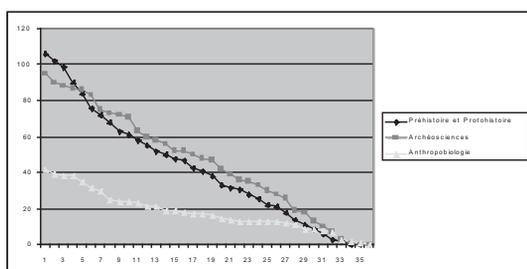
Ces effectifs se comparent, pour partie seulement, à ceux de la section 20 du CNU qui compte 47 professeurs et maîtres de conférences en Anthropologie biologique (n=8), en Préhistoire et Protohistoire (n=36) et en Sciences de l'environnement passé (n=3).

À ces chiffres, il conviendra d'ajouter le compte des protohistoriens de la 21<sup>e</sup> section, des géographes physiciens de la 23<sup>e</sup> section, des anthropo-biologistes et bio-archéologues des 67<sup>e</sup> et 68<sup>e</sup> sections et du Muséum National d'Histoire Naturelle.

Au cours des deux prochains quadriennaux les départs à la retraite concerneront

73 chercheurs avec une moyenne de 9 départs annuels; les trois années 2013 à 2015 verront plus de la moitié des départs (successivement 12, 15 et 11). Sans recrutements nouveaux la section compterait **204** chercheurs fin 2013 (compte tenu des 10 recrutements prévus en 2010) puis **158** chercheurs fin 2017.

**Tableau 1.** Évolution du nombre de chercheurs de la section 31 au cours des prochaines années (en abscisses, la valeur 1 représente l'année 2009; 3 l'année 2011 et ainsi de suite). « Archéosciences » désigne ici par facilité : la Géographie environnementale, la bio-archéologie, le paléoenvironnement et les sciences des archéomatériaux.



Le maintien du nombre de postes dont la section a bénéficié en 2009 et 2010 permettrait de stabiliser les effectifs à un niveau comparable aux autres sections de l'INEE ou de l'INSHS et de conduire une politique scientifique où l'équilibre entre la nécessité de développer de nouvelles thématiques, avec des outils modernes, et le très fort affaiblissement de certains champs sera très difficile à trouver.

En deçà de 7 postes par an les effectifs seraient inférieurs à 200 chercheurs fin 2017; un tel taux de renouvellement réduirait l'exercice de prospective à un mauvais colmatage des fuites dont aucun laboratoire ne sortira indemne.

Cet équilibre n'a pas vocation à être fondamentalement modifié au cours des deux prochains quadriennaux. Cependant la prise en compte (i) de l'émergence de nouveaux champs, qui représentent des enjeux scientifiques très forts, particulièrement aux interfaces disciplinaires, et (ii) de l'état de l'art dans les différentes disciplines, conduira inévitablement à des modulations, sinon à des choix drastiques.

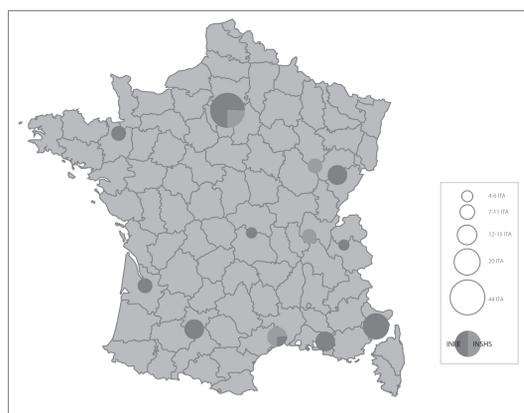
## Les ingénieurs et techniciens

La présente étude est fondée sur l'exploitation des données disponibles pour l'année 2008 (sources : département SHS et observatoire des métiers du CNRS); elle repose sur l'analyse des effectifs des seules unités rattachées à titre principal à la section 31. Résolument interdisciplinaire, la section est pourtant présente de façon très significative dans un nombre important d'unités rattachées à titre secondaire à la section 31 (unités de la section 32, 39...) (3).

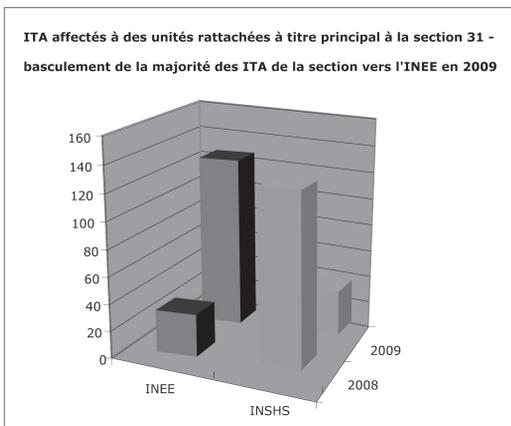
La composante ITA (ingénieurs, techniciens et personnels administratifs) de la section 31 rassemblait, fin 2008, quelques 161 agents – parmi lesquels on compte les 12 ITA de l'UMR 5608 TRACES (Toulouse), unité ayant obtenu son rattachement principal à la section 31 courant 2008. Les personnels ITA de la section 31 représentent 8% des effectifs des 10 sections du département/institut SHS (n=1768).

Leur répartition sur le territoire national est calquée sur la cartographie des unités : forte présence à Paris et dans la région parisienne (où le nombre des unités est élevé et où la taille de certains laboratoires est importante suite à une politique de fusion), bonne représentation dans le Sud, rareté dans l'Ouest et absente au nord comme au centre de l'hexagone.

Cartographie des ITA au sein des unités rattachées à titre principal à la section 31 (année 2009)



La réforme du CNRS – via le passage de départements scientifiques en instituts du CNRS – a contraint les unités de la section 31 –fortement interdisciplinaire – à choisir un opérateur parmi les divers départements/instituts partenaires. Une majorité des UMR a choisi d'être opérée par l'INEE, tout en conservant de forts liens scientifiques avec l'INSHS. Ce choix induit nécessairement, pour les personnels ITA, des conséquences à plus ou moins court terme sur leurs pratiques de travail, et probablement, sur le moyen terme, sur leur métier, leur carrière. En l'espace de quelques mois, le rattachement des ITA de la section 31 a basculé : affectés en 2008 très majoritairement à des unités SHS, ils sont près de 80% en 2009 à être affectés à des laboratoires opérés par l'INEE. La section souhaite suivre au plus près les répercussions de cette orientation scientifique sur les métiers des agents (continuum, évolutions, émergence de nouveaux métiers..., évolution des carrières) en menant une enquête auprès des DU et des personnels ITA au cours des 3 années à venir (4).



La composante ITA se répartit dans 7 branches d'activités professionnelles au sein desquelles dominent à parts presque égales les BAP F *information, documentation...* (27%) et D *sciences humaines et sociales* (26,4%). La BAP F correspond pour l'essentiel aux métiers de la documentation liés aux nombreuses et riches bibliothèques de recherche (qui comptent parmi les équipements lourds

des unités de la 31), ce qui explique son taux nettement supérieur à celui de l'ensemble du département SHS (31%); c'est au sein de la BAP D que le compte un nombre important d'agents accompagnant au plus près les chercheurs dans leurs activités scientifiques ou prenant activement part à la recherche (la part des IR y est notamment importante : près de 15% des effectifs de la BAP D). Cette BAP est elle aussi mieux représentée en 31 que dans l'ensemble des SHS (28%).

La BAP J, *gestion et pilotage*, rassemble un nombre significatif d'agents (22%); elle est suivie des BAP A *sciences du vivant* (11% contre 1% dans l'ensemble des sections SHS) et E *informatique, statistique et calcul scientifique* (8,1%). Les BAP B *sciences chimiques, sciences des matériaux* (mieux représentée dans les unités pilotées par la section 32) et C *sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique* sont plus marginalement représentées.

La répartition des ITA par corps (effectifs fin 2008 / début 2009), dévoile la part importante des techniciens (32,9%), ingénieurs d'études (34,1%) et ingénieurs de recherche (16,1%) (5).

Les prévisions de départs en retraite (et autres départs) des ITA par corps et par BAP laissent transparaître des perspectives catastrophiques à l'horizon 2010/2014 pour la BAP D. Ces départs accentueront les effets de ceux des chercheurs. La section s'alarme des conséquences scientifiques de telles érosions. Par ailleurs, les métiers de la documentation sont tout aussi menacés avec un nombre important de départs programmés dans la BAP F dans les corps d'ingénieurs d'études (responsables des centres de documentation) et des techniciens.

## 2 – PALÉONTOLOGIE HUMAINE, ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE ET FUNÉRAIRE

Correspondances CNU : *La Paléoanthropologie s'inscrit totalement au sein de la 20<sup>e</sup> section, tandis que l'Anthropologie biologique du vivant est également concernée par les 67<sup>e</sup> et 68<sup>e</sup> sections.*

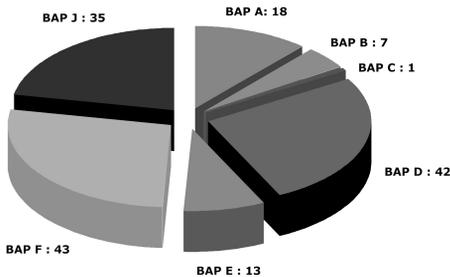
### Périmètre et thématiques spécifiques : L'Homme : évolution, diversité biologique, du Pliocène à l'Actuel

L'Anthropologie biologique a pour objet l'étude de la variabilité humaine sans pour autant exclure l'étude de certains référentiels non-humains – généralement des primates – dans une perspective diachronique, c'est-à-dire des origines de la lignée humaine à nos jours. Elle prend également en compte l'analyse des causes et conséquences de l'interaction de cette variabilité avec son environnement culturel et naturel, à l'exclusion des sciences des maladies et de l'art de les guérir.

En raison de sa double composante biologique et culturelle, le champ d'étude de l'anthropologie est particulièrement vaste mais son fil conducteur est l'étude des populations du passé ou du présent en prenant en compte la diversité et l'évolution humaine. Dans cette perspective singulière, quel que soit le thème de recherche abordé, l'homme est toujours envisagé en tant qu'être biologique et culturel, interagissant et évoluant avec son environnement physique, culturel et social et ce de manière diachronique. De ce fait, l'anthropobiologie est particulièrement attachée aux recherches de terrain et à la définition des échantillons qui vont être à la base de ses études.

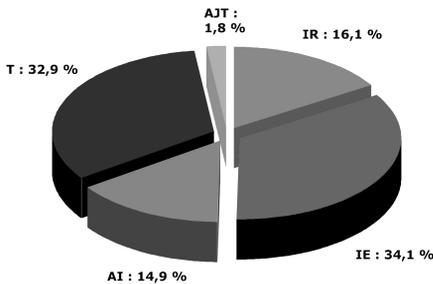
L'évolution de l'Homme s'exprime au-delà de la simple histoire naturelle de l'Homme (bien que seules les bases de cette dernière soient réellement connues). Outre la nécessité

section 31 : répartition des ITA par BAP (fin 2008)

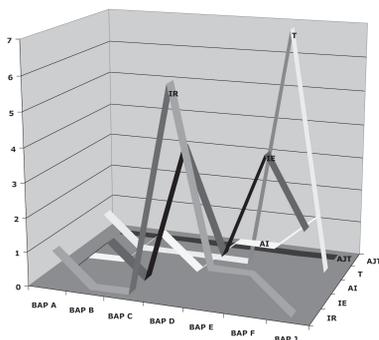


BAP A : sciences du vivant ; BAP B : sciences chimiques, sciences des matériaux ; BAP C : sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique ; BAP D : sciences humaines et sociales ; BAP E : informatique, statistique et calcul scientifique ; BAP F : information, documentation, culture, communication, édition, TICE ; BAP J : gestion et pilotage.

section 31 : répartition des ITA par corps (fin 2008)



section 31 : prévision des départs à la retraite (et autres départs) des ITA par corps et par BAP à l'horizon 2010/2014 (tranche d'âges 60-65 ans)



BAP A : sciences du vivant ; BAP B : sciences chimiques, sciences des matériaux ; BAP C : sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique ; BAP D : sciences humaines et sociales ; BAP E : informatique, statistique et calcul scientifique ; BAP F : information, documentation, culture, communication, édition, TICE ; BAP J : gestion et pilotage.

de la mise au jour de nouveaux fossiles humains (et ce quels que soient les taxons), de leur étude monographique, de la compréhension de l'histoire du peuplement dans le temps long, la **Paléanthropologie évolutive** se développe de plus en plus en synergie avec la compréhension des interactions biologie/environnements/culture et parallèlement aux données de la Paléo-génétique. La paléanthropologie nécessite des connaissances se fondant sur des référentiels récents complexes (de différents groupes de primates à la variabilité génétique des populations actuelles), l'étude de fossiles et la mise en œuvre de méthodes en constante évolution (paléogénétique, isotopes, imagerie 3D, modélisation des peuplements...).

L'**approche anthropobiologique des populations actuelles** comporte de nombreuses thématiques parmi lesquelles on peut citer : l'alimentation des populations humaines et ses conséquences sur la croissance et l'état de santé ; la dynamique biodémographique des populations et en particulier le rôle de la migration ; la variation des fréquences géniques entre populations ; l'incidence de l'environnement sur la microévolution des groupes humains ; l'adaptation physiologique ; la croissance et le vieillissement différentiel selon les écosystèmes, les cultures et les niveaux sociaux ; les indicateurs d'épidémies ; les représentations, les pratiques et les constructions corporelles.

### **Contributions aux thématiques transversales**

À l'interface entre l'anthropologie biologiques, la médecine légale et l'archéologie funéraire, l'**archéo-thanatologie** étudie l'ensemble des aspects biologiques et culturels que revêt le phénomène de la mort dans les sociétés anciennes (6). Il s'agit d'une discipline biologique avec toutefois un statut particulier qui accorde une large place au terrain. Elle est par nature interdisciplinaire – avec des interactions importantes avec l'histoire, l'ethnologie, la sociologie – mais aussi diachronique, la prise en compte de la diversité s'inscrivant dans une perception globalisante des processus taphonomiques. Au

sein de cette archéologie de la mort, l'archéo-thanatologie répond à un mode de raisonnement qui implique un croisement de diverses techniques d'investigation – relatives à la fois à la culture matérielle et à la biologie des individus – permettant de définir ce qui régit l'accès aux espaces funéraires, et ce quel que soit le contexte chrono-culturel. Ainsi les interfaces sont fortes avec les recherches conduites en section 32, voire 33 du Comité national.

C'est naturellement au sein de la thématique transversale « **Histoire des peuplements** » que s'exprime l'essentiel des recherches en **paléogénétique et en génétique des populations humaines**, deux domaines scientifiques en plein essor pour lesquels de nombreux travaux sont développés à l'échelon national et international (e.g. RTP-Paléo-génétique). L'objet de ces recherches est l'étude de la mise en place et de l'évolution des peuplements humains ainsi que des facteurs biologiques et sociaux qui les ont modelés. En dehors de la description de l'histoire du peuplement, se sont désormais les adaptations phénotypiques et physiologiques des populations ainsi que leurs interactions avec l'environnement (notamment bactérien et viral) qui sont l'objet d'études. Si, dans certaines régions du globe et pour les peuplements anciens, seules les méthodes classiques de la paléanthropologie peuvent être mises en œuvre (ostéométrie, caractères discrets) doublées d'analyses statistiques renouvelées, l'accent est mis de plus en plus sur la paléo-génétique (climats tempérés et froids notamment). En dehors de ces méthodes, la génétique des populations humaines contemporaines – qui a désormais accès à l'exome, aux régions régulatrices de l'ADN, aux micro-ARN et autres éléments modulateurs – fournit des scénarios de l'histoire du peuplement qui se doivent d'être confrontés aux autres types de données afin d'être confortés, modulés, infirmés.

### **Perspectives scientifiques**

Pour se développer, l'anthropologie biologique doit s'appuyer sur une de ses caractéristiques essentielles : l'interdisciplinarité. Le

caractère holistique de l'anthropologie biologique est en soi une chance pour la connaissance scientifique en général (7). L'approche singulière, transdisciplinaire par nature, de l'anthropologie biologique procure indéniablement aux disciplines voisines (biologiques, médicales, environnementales et culturalistes) un regard spécifique sur des objets d'étude communs.

De plus, la demande sociétale concernant l'anthropologie biologique est forte. Les interrogations sur l'évolution biologique de notre espèce, son adaptation aux changements rapides de mode de vie et d'alimentation, l'influence des migrations sur l'évolution des flux géniques, les modifications morphologiques ou physiologiques éventuelles du corps humain dans un futur proche ou lointain, ou plus généralement la connaissance du mode de vie des sociétés anciennes quel que soit le contexte chrono-culturel, entrent dans le champ des problématiques anthropologiques. Donner à comprendre la complexité des processus biologiques de transformation de notre espèce, en fonction d'un milieu évoluant rapidement, constitue également un fort enjeu.

Pour réaliser ces objectifs, l'anthropologie biologique doit tout à la fois renforcer son positionnement disciplinaire (définition et méthodes spécifiques) et développer ses capacités à travailler sur des objets interdisciplinaires complexes (les populations humaines, l'alimentation, la reproduction, le corps humain, la transmission et le patrimoine génétique...). Elle doit en conséquence élargir ses perspectives, au delà de la simple description des processus évolutifs ou de la diversité populationnelle. Elle doit notamment se positionner dans les débats scientifiques actuels concernant l'adaptation : rôle des patrimoines génétiques dans l'adaptation des populations humaines, rôle des facteurs culturels et sociaux dans l'évolution biologique, limites entre normal et pathologique dans des populations aux environnements et aux modes de vie différents... L'écologie humaine fait également partie de cette anthropologie biologique moderne qui reste à construire : rapport entre démographie croissante et disponibilité des

ressources alimentaires et énergétiques, problèmes liés au vieillissement, appréhension bio-socio-subjective du corps, ou encore étude des processus démographiques (migrations) qui ont participé et participent à la modification des pools géniques.

Le développement de la recherche en anthropologie biologique ne peut se faire qu'à plusieurs conditions : premièrement, en assurant la viabilité menacée de la discipline grâce à un recrutement régulier, notamment – mais pas seulement – au CNRS et dans les EPST ; deuxièmement, en alimentant le vivier de jeunes chercheurs par la mise en place d'enseignements de la discipline dans les filières biologiques, dès le premier cycle universitaire ; enfin, par la mise en place de réseaux de recherche à l'échelle nationale comme au niveau européen (8).

## Acteurs et structuration du champ

L'Anthropologie biologique est sous-représentée en France et sa répartition sur le territoire national est déséquilibrée. Le champ est essentiellement porté par 1 UPR (UPR2147 Paris), 4 UMR (UMR5199-Bordeaux, UMR6578-Aix-Marseille, UMR7194-MNHN, UMR7206-MNHN), 1 UMI (UMI3189-Dakar-Bamako-Ouagadougou-Aix-Marseille), 1 FRE (FRE2960-Toulouse). À cela on doit d'ajouter 5 chercheurs et 2 ITA rattachés à la S31 mais que l'on considère toutefois comme « isolés ». Ils se répartissent dans 4 structures de recherche (UMR5133-Lyon, UMR6130-Nice Sophia Antipolis, UMR7041-Nanterre, UMR9993-MCC) où leurs recherches concernent essentiellement l'archéo-thanatologie et la paléo-démographie (dans ce dernier cas en lien avec l'INED).

La pyramide des âges des acteurs CNRS de l'Anthropologie biologique est très préoccupante. Riche de 48 membres au plus, de 38 au moins (9), 7 de ses membres seront partis à la retraite à la fin du mandat de l'actuelle section 31. Onze de plus le seront à l'issue du mandat de la section suivante soit au mieux 37% des acteurs de l'Anthropologie biologique. L'urgence pour le CNRS se situerait

plutôt du côté de l'Anthropologie du vivant qui pourrait être réellement sous-représentée, et ce malgré la création récente de l'UMI3189 (10). Deux unités (UMR6578 et FRE2960) participent au renouvellement de ces aspects en développant une dynamique de recherches sur divers aspects de la variabilité des populations actuelles en lien avec une nouvelle communauté scientifique (EFS, praticiens hospitaliers, médecins, odontologistes, radiologues, psychiatres, etc.); cela se traduit par des problématiques partagées et parfois des transferts de technologie (11).

Enfin, cette situation est aggravée à l'Université par la faiblesse des effectifs des enseignants-chercheurs en Anthropologie biologique dépendant des sections 20 ou 67-68 du CNU (*cf. supra*), avec 5 professeurs (Poitiers, Toulouse 3, Aix-Marseille 2, Bordeaux 1) et 4 maîtres de conférences (Aix-Marseille 2, Bordeaux 1). La situation au MNHN est un peu plus favorable (3 professeurs et 3 maîtres de conférences).

En regard de la faiblesse des effectifs de chercheurs concernés, de leur dispersion entre plusieurs laboratoires et de l'existence de chercheurs isolés, la variété des thématiques de l'Anthropologie biologique pourrait apparaître comme une faiblesse plutôt que comme un avantage. Toutefois, le **réseau de collaborations et d'échanges** entre les laboratoires (e.g. RTP, GDR, sociétés savantes), ainsi que ceux développés avec les domaines de recherche des disciplines variées (préhistoire, protohistoire, histoire) ou voisines (biomédicales, bio-culturelles, environnementales, génétique des populations, imagerie) assure la cohérence et la productivité des études engagées ainsi qu'une dynamique interdisciplinaire toujours forte. Mais des écarts importants se creusent entre les champs disciplinaires, les équipements nécessaires à leur bon fonctionnement et l'intérêt porté aux supports éditoriaux permettant de valoriser les recherches. Il n'y aurait pas pire erreur que celle de considérer comme plus pertinente une anthropologie biologique davantage « sciences dures » au regard d'une anthropologie biologique orientée « sciences sociales ».

### Principaux partenaires du CNRS dans ce domaine

- MESR – Muséum national d'Histoire Naturelle, Universités Aix-Marseille 2, Bordeaux 1, Lyon 2, Nice, Paris 1, Toulouse 3, EHESS, EPHE
- Direction de l'Architecture et du Patrimoine (MCC)
- UMIFRE et Écoles Françaises à l'étranger (MAEE-MESR)
- Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (MCC-MESR)
- Institut National d'Études Démographiques
- Institut Pasteur
- Établissement Français du Sang

## 3 – PRÉHISTOIRE ET PROTOHISTOIRE

Correspondances CNU : *La Préhistoire s'inscrit totalement au sein de la 20<sup>e</sup> section. L'Archéologie protohistorique s'inscrit en 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> sections.*

### Périmètre et thématiques spécifiques : Sociétés préhistoriques et protohistoriques : évolution et diversité des comportements / pratiques culturelles

Les recherches menées sur les sociétés du passé sont orientées autour de deux grandes questions s'appuyant à la fois sur des faits diachroniques et synchroniques : a) l'évolution des sociétés depuis les débuts de l'humanité, b) la diversité culturelle au cours des âges.

Les approches selon lesquelles sont traitées ces questions représentent actuellement l'un des points forts de l'archéologie française

qui, de ce point de vue, se positionne au premier plan international. Ces approches privilégient une interprétation des données archéologiques en termes de pratiques techniques, économiques, sociales, artistiques, funéraires et symboliques, ces pratiques témoignant à la fois de mécanismes évolutifs et de facteurs identitaires. La lecture des pratiques culturelles anciennes et de leur évolution fait appel à un ensemble de données expérimentales ou de référence où la collaboration interdisciplinaire avec de nombreux domaines scientifiques joue un rôle majeur : sciences cognitives, ethnologiques, historiques, anthropologiques, éthologiques, sciences des matériaux, sciences de l'ingénieur, sciences de l'environnement. Ces collaborations permettent en particulier la construction de régularités ou encore de modèles qui mettent en relation vestiges observables et interprétations non observables, et dont le transfert sur les données archéologiques, essentielle à la démarche interprétative, est conditionné par leur fondement.

## Évolution des sociétés

L'étude de l'évolution des sociétés, quelles que soient les aires chrono-culturelles, soulève la question des formes de l'évolution (continue *vs* discontinue) et des mécanismes sous-jacents. S'agissant des formes de l'évolution, l'un des enjeux actuel est un examen critique des descripteurs archéologiques et de la notion de temporalité, ceci en collaboration avec les disciplines de l'environnement. S'agissant des mécanismes évolutifs, sont appliquées d'une part des approches qualitatives qui visent à comprendre la variabilité des faits enregistrés, d'autre part des approches quantitatives par le biais de modèles intégrant des facteurs comme la démographie, les modes de transmission, les niches écologiques. Les périodes charnières ou dites de « transition » sont les périodes privilégiées pour traiter de l'évolution.

Les périodes anciennes, tant en Afrique et en Asie qu'en Europe, permettent d'aborder les questions relatives aux processus d'hominisa-

tion et à l'expansion des hommes modernes sur l'ensemble des continents. La recherche française y tient une place de choix, procurant des faits résolument originaux pour traiter du développement des habiletés cognitives et des comportements culturels des hommes anciens et modernes. Dans un contexte de forte émulation et concurrence internationale, la lisibilité des chercheurs français dans ce domaine s'est considérablement accrue au cours de la dernière décennie par des efforts patents de publication et diffusion de leurs travaux dans des supports à large impact.

Les périodes plus récentes couvrent un ensemble de transitions que caractérisent des changements culturels profonds bouleversant les sociétés. Ces changements majeurs peuvent se manifester à des périodes différentes selon les lieux (Europe, Asie, Afrique et Amérique) ou au contraire, dans certains cas, faire preuve de synchronie indépendamment de tout contact entre sociétés, soulevant dès lors la question des convergences et des facteurs sous-jacents. Chaque transition présente des cas d'étude traitant d'une part de scénarios historiques qui s'attachent à restituer des faits synchroniques et diachroniques à travers une plus grande « objectivité » possible, d'autre part des mécanismes évolutifs sous-jacents à ces scénarios. L'un des enjeux de la discipline est aussi de définir les cadres théoriques permettant de traiter à la fois des processus récurrents universels, et des phénomènes diachroniques irréversibles relevant de l'histoire.

Mais au-delà de ces périodes « témoins », l'étude de l'évolution des sociétés implique aussi une analyse fine de la dynamique interne à chaque grande période chrono-culturelle. Celle-ci nécessite en préalable la caractérisation des cultures étudiées.

## Diversité culturelle au cours des âges

La caractérisation des « cultures » constitue le cœur de la démarche archéologique. Nous les menons dans les cinq continents. Elle implique à la fois des fouilles et des études de collections.

Aujourd'hui la caractérisation des cultures passées ne se résume plus aux aspects d'ordre chrono-culturel. Les avancées récentes ont consisté à enrichir la vision anthropologique des cultures du passé, en resituant en particulier les données archéologiques dans une dynamique socio-économique et culturelle. Cette perspective anthropologique, qui s'attache ainsi à comprendre les contextes sociaux de production et de transmission des pratiques ainsi que les formes d'expression culturelles, traverse l'ensemble des terrains archéologiques. Elle permet de rejoindre le programme universaliste de l'anthropologie qui est de mieux définir la spécificité et l'unicité de l'homme à travers la diversité de ses réalisations sociales et culturelles.

L'analyse dynamique des « cultures » implique à la fois la programmation de fouilles sur des sites clés avec la collaboration de nombreux spécialistes de l'habitat, de la culture matérielle, des pratiques funéraires et de l'environnement (milieu physique, biomasse) ainsi que la mise en œuvre de méthodes d'étude des processus de formation et d'évolution des formations naturelles ou anthropiques qui contiennent les assemblages.

### **Contributions aux thématiques transversales**

L'**ethnoarchéologie** est une approche actualiste qui fournit des référentiels nécessaires à l'interprétation des données archéologiques au même titre et en complément des approches expérimentales. En France, elle est développée autour des questions d'ordre technologique et stylistique (interprétation de la culture matérielle en termes de tâches techniques, d'habiletés, de systèmes socio-économiques ; interprétation des changements techniques et stylistiques). Elle est toutefois peu enseignée et n'a fait l'objet que de peu de thèses. Développée le plus souvent par des chercheurs déjà en poste, elle est soutenue par la section étant donné à la fois la nécessité épistémologique de développer des référentiels actualistes pour interpréter les données

archéologiques, la vitesse à laquelle le patrimoine culturel lié aux pratiques techniques traditionnelles disparaît et la faible attraction que représente l'anthropologie des techniques en ethnologie.

### **Perspectives scientifiques**

Préhistoire et protohistoire doivent impérativement maintenir le cap interdisciplinaire dans lequel elles inscrivent leurs actions en construisant leurs objets de recherche et leurs développements méthodologiques en lien étroit avec les autres sciences de l'Homme et de la Société (« anthropologie culturelle », histoire, sciences cognitives) au même titre qu'avec les sciences de la vie et de la terre, de la physique et de la chimie (paléo- ou archéo-anthropologie, bio- et géoarchéologie et archéosciences). Ainsi la bioarchéologie ou la taphonomie par exemple ont fortement contribué à la révision et au renouvellement, à différentes échelles, de modèles d'évolution ou de peuplement antérieurement établis sur des bases uniquement culturalistes. De même, bon nombre d'évolutions biologiques ou environnementales ne peuvent être perçues hors du contexte culturel et social au sein desquels elles s'expriment. L'ensemble fait système.

La demande sociétale en direction du patrimoine reste très forte et les recherches concernant les périodes pré- et protohistoriques sont appelées à jouer un rôle majeur, au moment où l'opinion publique est appelée à s'interroger sur la pertinence de concepts tels que l'identité, l'ethnicité, les civilisations, les aires culturelles... La question des rapports entre variabilités biologiques et culturelles, entre dynamiques sociétales et environnementales – en particulier dans le contexte du changement global – constitue un enjeu considérable au sein duquel l'approche des déterminants culturels ne peut évidemment pas passer au second plan.

De même, des questions patrimoniales cruciales (e.g. observation, conservation et datation des œuvres d'art pariétal, paléolithiques ou postérieures) doivent être prises

en charge dans le cadre d'une politique interdisciplinaire volontariste.

Dans la prochaine période, les enjeux se situent tout autant au niveau de l'identification de nouveaux objets de recherche qu'au niveau de ses outils.

Un vaste champ est ouvert au développement, d'une part, des référentiels nécessaires à l'interprétation des données archéologiques – celle-ci se situant en dehors du champ de l'archéologie –, d'autre part, à celui d'outils nouveaux dans le domaine des STIC : modélisation des systèmes de peuplement, des transferts et des échanges, ingénierie 3D appliquée à différentes échelles (de l'analyse de l'habitat l.s. à celle des productions matérielles et au décodage des systèmes symboliques). Ces directions impliquent un effort soutenu en faveur de la construction et de l'exploitation de bases de données, du développement des outils d'analyse statistique (e.g. systèmes multi-agents). En outre l'accent mis sur les SGBD doit contribuer à l'évolution / modernisation des politiques éditoriales.

Enfin, la coordination au sein des UMR de la politique de formation à et par la recherche est une urgence, en regard de la rareté des moyens offerts par les universités dans ce domaine (12). Dans ce cadre, ainsi qu'en master, il est important de pouvoir proposer des formations qui intègrent les « archéosciences », en rompant avec une distinction dépassée archéométrie vs. archéologie. Il est souhaitable de valoriser le rôle que joue le champ des recherches préhistoriques et protohistoriques comme conservatoire d'un panel de connaissances et de référentiels naturalistes, délaissées par le positionnement des sciences de la vie et de la terre sur des objets plus globaux (terre globale, biosphère).

## Acteurs et structuration du champ

Les unités traitant de Préhistoire et Protohistoire sont assez largement réparties sur le territoire métropolitain, bien que l'on observe un important déséquilibre entre la Région pari-

sienne (6 unités) et la Province (8 unités principales).

Le champ est essentiellement porté par 12 UMR relevant principalement de la section (UMR5133-Lyon, UMR5140-Lattes, UMR5199-Bordeaux, UMRE5594-Dijon, UMR5608-Toulouse, UMR5666-Rennes, UMR6130-Nice, UMR6636-Aix-Marseille, UMR7055-Nanterre, UMR7194-MNHN, UMR8096-Nanterre, UMR9993-Paris) et par 2 UMR en rattachement secondaire (UMR7041-Nanterre, UMR8546-Paris). Deux autres unités en rattachement secondaire accueillent deux chercheurs « isolés » : UMR5138-Lyon (n=1), UMR6573-Aix-Marseille (n=1).

Les situations – relativement contrastées – rencontrées parmi les chercheurs en préhistoire et protohistoire sont les suivantes :

a) Les points forts de l'archéologie française telle qu'elle est actuellement représentée en section 31 sont : les études paléolithiques en Europe et en Afrique ; les études néolithiques en Europe et en Méditerranée orientale ; les études protohistoriques dans les domaines européens et asiatiques (Asie centrale, Proche- et Moyen-Orient) ainsi qu'en Amérique centrale. Pour chacun de ces thèmes, on rencontre des communautés comprenant entre 7 et 23 chercheurs.

b) Des communautés plus restreintes (de 2 à 5 chercheurs) animent des travaux sur le Paléolithique du Proche- et Moyen-Orient ; le Néolithique africain ; la Protohistoire d'Extrême-Orient (13).

c) En revanche, le CNRS est très faiblement représenté voire totalement absent des recherches conduites dans les domaines suivants : les chasseurs-cueilleurs d'Amérique, d'Extrême-Orient comme celui d'Océanie ; le Néolithique d'Extrême-Orient, d'Amérique et d'Océanie ; la Protohistoire africaine ; l'art rupestre et pariétal d'une façon générale. Pour l'ensemble de ces thèmes, le CNRS dispose de moins de 10 agents.

Dans les années à venir, il paraît indispensable que la politique de recrutement s'attache à établir un équilibre entre le renforcement des

pôles de compétences signalés précédemment (a et, dans une moindre mesure, b), pour lesquels le CNRS jouit d'ores et déjà d'une large visibilité internationale, et le développement de terrains pratiquement vierges ou nouveaux (c). La communauté devra veiller à développer

de façon homogène la qualité des questionnements et des pratiques scientifiques en évitant de laisser à l'écart des avancées méthodologiques de vastes aires culturelles au prétexte de leur « spécificité » ou des « traditions de recherche » qui y ont été jusqu'ici engagées.

**Sciences des sociétés du passé – répartition chrono-géographique  
des chercheurs de la section 31 (2010)**

	TOTAL 1	TOTAL 2	France et Europe	Eurasie	Moyen et Proche-Orient	Asie	Afrique	Eurafrique	Europe et Amérique	Amérique	Océanie
Protohistoire – Fer		11	11								
Protohistoire – Bronze		5	4		1						
Protohistoire – Général	42	26	2	1	11	3	1			7	1
Préhistoire – Général	2	2					1			1	
Néolithique / Protohistoire	1	1	1								
Néolithique		23	12	5	4		2				
Épipaléolithique / Néolithique	31	8	2	4	1	1					
Paléolithique sup. / Néolithique	2	2		2							
Paléolithique supérieur		14	11	1				1	1		
Paléolithique moyen – sup.		3						3			
Paléolithique moyen		3		1				2			
Paléolithique inf. – moyen		4	2	1				1			
Paléolithique inf.		26					2				
<b>TOTAL</b>	<b>104</b>	<b>104</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>1</b>



Communauté composée de 2 à 5 personnes

Cette politique devra tenir compte de paramètres démographiques impliquant que, même qu'au sein de plusieurs domaines apparaissant aujourd'hui comme étant les

plus forts de l'activité des chercheurs de la section 31, la situation peut être rapidement inversée en fonction des prochains départs en retraite.

La répartition des forces au sein de ce groupe, au CNRS, se présente comme suit :

- On compte seulement 5 chercheurs pour le Paléolithique inférieur dont 4 seront en retraite d'ici 2017 et 10 chercheurs pour le Paléolithique moyen dont 4 seront en retraite d'ici 2017. Le très faible effectif de chercheurs travaillant sur les périodes très anciennes est particulièrement marqué pour l'Acheuléen, qui ne comptera plus qu'un seul spécialiste d'ici 2011.

- Pour les périodes plus récentes, si la communauté des chercheurs travaillant sur le Paléolithique supérieur, l'Épipaléolithique, le Mésolithique et le Néolithique en Europe a bénéficié d'un effort signalé de recrutement au cours des dernières années, en revanche, en Protohistoire française, la démographie des chercheurs sur l'âge du Bronze et l'âge du Fer est en nette décroissance (moitié des effectifs d'ici 2017) (14). L'âge du Bronze en France apparaît toujours comme un contexte sinistré avec seulement 2 chercheurs en 2011.

Ce constat est particulièrement vrai pour la recherche française à l'étranger, laquelle occupe pourtant de longue date plusieurs terrains où les enjeux scientifiques sont cruciaux :

- Ainsi, on compte 8 américanistes travaillant sur les périodes récentes (surtout en Amérique centrale) dont 4 quitteront leur fonction d'ici 2013. En Orient, la situation est également alarmante et les 2/3 des archéologues orientalistes (dont le Proche- et Moyen-Orient, l'Asie centrale et l'Asie du sud-est) partiront à la retraite entre 2009 et 2015.

Bien que les points de fragilité ne soient pas les mêmes qu'au CNRS, la situation dans les universités est tout aussi préoccupante avec 39 enseignants-chercheurs en Préhistoire et Protohistoire seulement à la fin 2009 en section 20 du CNU (15).

- Pour le Paléolithique inférieur et moyen, on compte 4 PR et 3 MC rattachés à la 20<sup>e</sup> section du CNU (1 PR et 1 MC seront à la retraite d'ici 2017).

- Le Paléolithique supérieur regroupe 2 PR qui partiront à la retraite d'ici 2017 et 5 MC.

- L'Épipaléolithique, Mésolithique et Néolithique concernent 4 PR qui partiront tous à la retraite d'ici 2017 et 8 MC.

- Quant à la Protohistoire au sens large, elle réunissait fin 2009 13 Enseignants-chercheurs : 7 PR dont 6 seront à la retraite d'ici 2017 (et pour 5 d'entre eux d'ici 2012) et 6 MC.

En ce qui concerne les aires culturelles, les forces sont diversement réparties avec 6 Enseignants-chercheurs sur les différents domaines africains, 4 américanistes et 1 océaniste. Si le gros des forces enseignantes se consacre aux recherches en Eurasie, en Europe et en France, il faut cependant noter la quasi-absence d'enseignements dédiés au Proche et Moyen-Orient.

De manière générale, en préhistoire et protohistoire, on constate une érosion du nombre des chercheurs formés à analyser et questionner les données archéologiques dans une perspective à la fois sociale, culturelle et historique et armés pour intégrer les apports des sciences anthropologiques et expérimentales pour le renouvellement du discours scientifique. Or, il faut se rendre à l'évidence : les questions complexes posées tant par l'évolution des sociétés que par leur diversité ne pourront être traitées en l'absence de communautés de chercheurs suffisamment étoffées – en particulier dans des domaines structurellement peu représentés parmi les autres institutions de la recherche française, notamment à l'université. Leur recrutement par le CNRS apparaît donc comme une priorité.

En ce qui concerne la recherche française à l'étranger, le positionnement international de ces recherches s'appuie sur des instituts dépendant de plusieurs tutelles dont le Ministère des Affaires Étrangères et Européennes. Toutefois, en dépit de leur forte réputation, ces derniers ont du mal à se maintenir dans les différentes zones géographiques couvertes par la section 31. Une politique interinstitutionnelle et intersections doit être envisagée pour maintenir l'archéologie française à l'étranger et ses terrains dont l'abandon reviendrait à perdre le bénéfice d'années de présence. De même, une réflexion doit être conduite pour cibler des

secteurs clés dans lesquels les chercheurs français occupent une place originale ou très lisible au plan international, et qu'il conviendra de renforcer.

#### **Partenaires du CNRS dans ce domaine :**

– MESR – Muséum national d'Histoire Naturelle, Universités Aix-Marseille 1, Bordeaux 1, Dijon, Grenoble 1, Lyon 2, Montpellier 3, Nantes, Nice, Paris 1, Paris 10, Rennes 1, Rennes 2, Strasbourg 2, Toulouse 2

– Direction de l'Architecture et du Patrimoine et DRAC (MCC)

– UMIFRE et Ecoles Françaises à l'étranger (MAEE-MESR)

– Institut de Recherche pour le développement (MESR-MAEE)

– Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (MCC-MESR)

## **4 – BIOARCHÉOLOGIE, PALÉOENVIRONNEMENTS, GÉOARCHÉOLOGIE ET GÉOGRAPHIE ENVIRONNEMENTALE**

Correspondances CNU : La Géographie physique et environnementale se retrouve au sein de la 23<sup>e</sup> section. Les Paléo-environnements quaternaires, la Bio-archéologie, la Géo-archéologie, la Bio-chronologie s'articulent avec les 20<sup>e</sup>, 36<sup>e</sup>, 67<sup>e</sup> et 68<sup>e</sup> sections.

**Périmètre et thématiques spécifiques :** Caractérisation et évolutions des cadres physiques et environnementaux de l'activité humaine, du Pliocène à l'Actuel.

Les chercheurs CNRS impliqués dans le large domaine scientifique que recouvre l'étude des dynamiques paléo-environnementales se répartissent – certes inégalement en

fonction des disciplines – dans différentes sections du Comité National (18, 19, 20) ou Instituts (INEE, INSU). Dans ce contexte, les chercheurs regroupés dans la section 31 se démarquent en focalisant leurs thématiques et leurs travaux sur une approche clairement anthropo-centrée des problématiques paléo-environnementales. Mobilisée sur des recherches actualistes ou mobilisant des indicateurs biotiques ou abiotiques archivés dans des contextes archéologiques ou non-anthropisés (archives lacustres, tourbières, séquences alluviales...) la communauté des bio-archéologues, des paléo-environmentalistes et des géographes de l'environnement a pour principal objectif la caractérisation des dynamiques de l'environnement du Pléistocène à l'Actuel, ainsi que celles des interactions ou coévolutions entre les sociétés et leurs milieux. Initiatrice d'avancées considérables dans le domaine de l'interdisciplinarité entre sciences sociales et naturelles et dans le développement de méthodologies innovantes (génétique, géochimie isotopique, géo- et bio-chronologie, indicateurs biologiques ou biogéochimiques) cette communauté, constituée par plus de 80 chercheurs relevant de la section 31, s'implique dans des champs de recherches diversifiés en fonction des disciplines.

### **L'archéobotanique**

L'archéobotanique, prise dans son acception la plus large, est un champ disciplinaire fortement ancré dans la section 31, cette dernière assurant une part importante du recrutement des chercheurs CNRS impliqué dans ce domaine (16). D'autres disciplines, à l'instar de la palynologie bénéficient certes de recrutement dans d'autres sections des SDV ou de l'INSU (20, 29, 18), mais dans ce cas, si la discipline reste identique, les objets de recherches différent considérablement en se concentrant sur des approches essentiellement paléoclimatiques souvent éloignées des problématiques socio-écologiques.

En regard du développement récent des problématiques environnementales et des

enjeux qu'elles recourent (biodiversité, conservation, analyses des perturbations...), l'effectif reste extrêmement faible avec un total de 17 chercheurs et un très faible nombre d'ITA toutes spécialités confondues. On notera également un certain déséquilibre en fonction des spécialités : l'anthracologie est représentée par 8 chercheurs en poste (Paris n=4, Nantes n=1, Montpellier n=1, Nice Sophia Antipolis n=2), la palynologie par 4 chercheurs (Toulouse n=2; Besançon n=1; Montpellier n=1 (recruté en section 45)); la carpologie, par 3 chercheurs (Montpellier n=1; Lyon n=1; Paris n=1), la dendrologie par seulement 2 chercheurs (Marseille n=1, Rennes n=1). La situation à l'Université est tout aussi critique avec un très faible nombre d'EC dans ces domaines de spécialités. À l'insuffisance de chercheurs impliqués susceptibles d'assurer l'animation de la recherche et la formation dans ces domaines, s'ajoute une réelle pénurie en matière de profils techniques (AI, IE, IR) indispensables pour le fonctionnement des plateaux techniques associés à ces spécialités. Un effort de recrutement doit être effectué dans ce sens. Il conviendra également de veiller au renouvellement permettant un maintien de l'effectif mais aussi de s'engager sur une politique de renforcement de certaines spécialités (palynologie, carpologie, dendrologie) pour certaines émergentes (phytolithes), voire à anticiper sur le développement de nouvelles spécialités innovantes. Si, à l'heure actuelle, aucune de ces disciplines n'est directement menacée par un vieillissement de sa population, plusieurs départs en retraite vont concerner cette communauté dès 2014-2015 (n=2). L'existence d'un vivier (en doctorants et post-doctorants) offre la possibilité d'anticiper sur cette dynamique qui s'accélérera à partir des années 2020.

Cette communauté travaille essentiellement dans le domaine de l'analyse des interactions société-milieux à partir de l'analyse de l'évolution du couvert végétal (palynologie, phytolithes) ou de l'exploitation des ressources ligneuses (anthracologie) ou plus largement végétale (carpologie). Sans pour autant négliger l'acquisition de données primaires destinées à la reconstitution des environnements anciens et à leurs dynamiques, on assiste à

l'émergence de nouvelles orientations de recherches en direction des questions d'agrobiodiversité, d'évolution de la diversité végétale, de coévolutions, en développant de nouvelles approches (dendrologie appliquée à l'anthracologie, géochimie isotopique, modélisation spatiales retro-prospectives, mobilisation des référentiels actuels). Ces approches, intégrées dans des démarches résolument diachroniques, concernent principalement les périodes temporelles allant de la fin du dernier épisode glaciaire à l'actuel. Les terrains de recherche sont diversifiés et concernent le territoire métropolitain dans sa globalité (zones littorales, milieux montagnards, grandes vallées alluviales), l'Europe tempérée, et l'intégralité du bassin méditerranéen. L'Afrique et *a fortiori* le continent sud-américain sont insuffisamment dotés dans ces domaines, ce qui est pénalisant en regard des enjeux et de la concurrence internationale.

## L'Archéozoologie

L'intégration de l'archéozoologie à la reconstitution des sociétés du passé bénéficie d'un ancrage très fort, et quasi exclusif, au sein de la section 31, qui est la seule à assurer le recrutement de chercheurs et à soutenir le développement de cette discipline. Elle réunit 32 des 34 chercheurs et ingénieurs en poste au CNRS, deux autres chercheurs relevant de la section 32. Indépendamment du constat que l'archéozoologie des périodes historiques est exclusivement investie par des chercheurs relevant de l'archéologie préventive (Inrap, collectivités territoriales, organismes privés), cette situation devrait inciter à soutenir le recrutement, sur la section 31, d'archéozoologues dont les thématiques ne se confondent pas strictement à l'aspect chronologique de son périmètre et à tout le moins susciter une concertation inter institutionnelle (INEE, INSHS) et intersection (31, 32, 45). Cette discussion s'avère d'autant plus nécessaire que le vivier est important (une vingtaine de post-docs et autant de thèses en cours avec des thématiques au sein desquelles les périodes historiques sont bien couvertes). C'est en effet

un enjeu capital pour l'histoire des pratiques, de l'anthropisation, de la biodiversité, car c'est la période qui fait le lien entre la protohistoire et l'actuel et qui éclaire pareillement les approches relevant des deux sections et concernent donc très fortement la section 31. Parmi les thématiques peu représentées mais dont le développement serait souhaitable, l'étude des micromammifères, qui ne compte plus aucun spécialiste, serait à soutenir de même que l'archéo-ichtyologie en situation de fragilité, du fait du départ de 2 acteurs majeurs de ce champ. Parmi les points forts de la discipline, on peut souligner un potentiel de rayonnement international prometteur (thèses en cotutelle en cours en Iran, Liban, Syrie, Oman, Yémen, post doc Amérique andine).

Les chercheurs en Archéozoologie au CNRS sont confrontés à une demande croissante d'archéologues de diverses origines souhaitant appliquer des protocoles de fouille et d'enregistrement spécifiques à l'archéologie des animaux. Cette formation n'est pas du ressort strict du CNRS mais pourrait être soutenue par l'intermédiaire d'aides financières, d'autant que les archéo-zoologues (de la section 31) du CNRS sont souvent appelés à intervenir dans ce domaine et pourraient activement participer à la construction des liens interinstitutionnels avec les opérateurs d'archéologie préventive.

## La géographie environnementale

Il s'agit de la seule discipline naturaliste à introduire l'effet systémique humain. Il n'est pas, de ce fait, surprenant, que la section 31 assure le recrutement de chercheurs et soutienne le développement de cette discipline, même si l'effort de l'INEE, auquel se sont très majoritairement ralliés ses membres, pourrait être plus soutenu et ne point se disperser par le transfert de postes en direction de la section 39.

Sur les neuf unités évaluées par la section 31, trois lui sont principalement rattachées (EDyTeM de Chambéry, GÉOLAB de Clermont-Ferrand, Laboratoire de géographie physique de Meudon-Bellevue), et six secon-

dairement, dont cinq dépendent de la section 39 (ADES de Pessac, ENC de Paris, EVS de Lyon, GEODE de Toulouse, LETG du « grand Ouest », PRODIG de Paris) et les deux dernières de sections de l'INSU (Centre de recherches de climatologie de Dijon et CEREGE d'Aix-en-Provence). S'y ajoutent quelques géographes physiciens intégrés en tant que chercheurs à des laboratoires SHS travaillant notamment en archéologie et en géographie sociale, mais qui ne sont pas constitués en tant qu'équipe (Archéorient de Lyon ou Espace de Nice). Il en va de même d'un nombre extrêmement limité de collègues appartenant à des laboratoires de SDV ou SDU.

Au sein de cette géographie environnementale, deux axes concentrent les principaux efforts.

## La géomorphologie dynamique

Les thématiques relevant de la géomorphologie structurale et de la géomorphologie climatique, qui ont longtemps été les deux piliers de la discipline, ont fait place à des études portant sur les dynamiques des processus dans les milieux physiques. En dehors des milieux karstiques, pour lesquels l'intérêt des chercheurs n'a jamais fléchi, ce sont désormais les milieux dotés d'une forte mobilité qui suscitent la plus grande abondance de travaux depuis un quart de siècle, c'est-à-dire depuis l'instauration de la nouvelle thèse de doctorat. Ainsi sont privilégiés les travaux sur les lits fluviaux, les versants montagnards et les littoraux pour lesquels la comparaison des situations – offertes par les cartes, les photographies aériennes et les images satellitaires – permet de retracer et d'évaluer l'importance de l'évolution récente. Des efforts ont été postérieurement consentis dans la mise au point de capteurs originaux dans des milieux extrêmes et dans l'instrumentation de sites pilotes. Non seulement ces recherches répondent à des préoccupations sociétales concrètes, notamment par l'évaluation des risques dits « naturels », mais elles sont également en prise avec les réflexions menées sur le « changement

global» au travers des tendances enregistrées, qu'il s'agisse de la récurrence des crues, de la contraction des cryosphères ou de la tempé-  
tuosité des espaces marins. Parallèlement, la reconstitution des paléodynamiques passe nécessairement par ce constant approfondissement de la connaissance des processus actuels.

## La géoarchéologie

La section 31 a parallèlement favorisé un dialogue étroit avec la communauté des archéologues, les spécialistes de géographie environnementale travaillant sur le thème de la reconstitution des rythmes climatiques (et des variations verticales de la ligne de rivage). La définition des conditions paléo-environnementales durant les différents cycles climatiques quaternaires représente un sujet d'étude fondamental pour l'analyse des facteurs d'implantation humaine et la compréhension de la taphonomie des sites archéologiques. La contribution de la section porte sur les rythmes, les seuils et les ruptures associées aux variabilités naturelles et aux mutations sociales, plus particulièrement depuis le Néolithique, avec les premières formes d'artificialisation des milieux. Cette thématique s'appuie sur un large éventail de compétences, et, à côté d'approches plus éprouvées (bio-stratigraphie, sédimentologie, pédologie...), quoiqu'affinées (comme l'analyse des spéléothèmes), elle a bénéficié du développement récent des travaux sur les bio-indicateurs (pollens, mollusques, diatomées, chironomes, faunes marines, etc.) et, naturellement, du renforcement des méthodes de datation à haute précision appliquées aux archives sédimentaires.

La convergence de ces deux axes doit favoriser l'émergence de travaux portant sur l'articulation Actuel-Passé : les paléo-environmentalistes tendent à aborder des périodes plus récentes, tandis que les chercheurs travaillant sur les dynamiques contemporaines remontent le cours de l'histoire. L'étude des derniers siècles met suffisamment en évidence la spécificité relative des temps sociaux et des périodes climatiques pour que cette connexion ne puisse qu'améliorer la caractérisation des coévolutions

homme-milieux et favoriser le développement d'approches modélisatrices applicables au passé et susceptibles d'être mobilisées pour la réalisation de scénarios prospectifs.

La géographie environnementale, qui rassemble 39 chercheurs, va souffrir d'une importante baisse d'effectifs au cours des 7 prochaines années avec 15 départs (- 2 ch/an), au-delà le profil est moins critique (- 0,9 ch/an).

La prospective est rendue difficile par la dispersion des outils et la variété des échelles de travail. À l'heure actuelle, 16 chercheurs travaillent sur l'Actuel, 22 sur l'Holocène et 10 sur le Pléistocène. D'ici 2014, les géographes physiciens travaillant sur l'Actuel ainsi que les géo-archéologues du Pléistocène vont perdre plus de la moitié de leurs effectifs. En outre ces deux domaines vont perdre l'essentiel des DR ; l'encadrement doctoral par ces derniers est crucial pour les recherches sur le Pléistocène, moins bien ancrées à l'université que la géographie environnementale. En revanche, l'Holocène est moins touché avec un tiers de départs et une majorité des DR restant en poste au-delà des 9 prochaines années. Globalement, le groupe compte un peu plus de 25 % de DR parmi les moins de 55 ans.

Pour ce qui concerne les aires géographiques, la couverture est déséquilibrée. On est notamment frappé par la carence des recherches sur des terrains à fort enjeu pour la section, comme la zone intertropicale et les domaines désertiques.

Un autre problème, très préoccupant pour assurer les articulations entre les différentes composantes de la section, est la quasi disparition des chercheurs travaillant sur les sédiments anthropiques en faisant appel à un large spectre méthodologique. Ce point doit être pris en considération de façon très urgente (bourses de doctorat fléchées).

## Acteurs et structuration du champ

Les unités traitant d'Archéobotanique, d'Archéozoologie et plus largement de Paléo-environnement et de Géographie environne-

mentale sont largement réparties sur le territoire métropolitain et les champs scientifiques sont essentiellement portés par 13 UMR relevant de la section 31 (UMR7009-Paris, UMR8591-Meudon, UMR6130-Sophia Antipolis, UMR5133-Lyon, UMR6249-Besançon, UMR6566-Rennes, UMR7041-Nanterre, UMR6042-Clermont-Ferrand, UMR7194-Paris, UMR6636-Aix-en-Provence, UMR5608-Toulouse, UMR5199-Bordeaux, UMR5104-Le Bourget) et par 3 UMR en rattachement secondaire (UMR5602-Toulouse (39), UMR6635-Aix-en-Provence (18), UMR6116-Marseille (20)).

On notera également la forte quantité de chercheurs « isolés » (n=10) dans plusieurs autres unités en rattachement secondaire mais relevant principalement de la 39, 20, 32, 38 et 19 : UMR5210-Dijon (n=1), UMR6573-Marseille (n=1), UMR7044-Strasbourg (n=1), UMR6012-Sophia-Antipolis (n=1), UMR5600-Lyon (n=1), UMR8157-Villeneuve-d'Asq (n=1), UMR6554-Nantes (n=1), UMR5564-Grenoble (n=1), UMR6143-Caen (n=1), UMR8586-Paris (n=1).

De manière prospective, il paraît opportun que la politique de recrutement veuille à rétablir l'équilibre entre Paris et Province, en renforçant notamment certains pôles de compétences régionaux bien individualisés où émergents dans le champ de la géographie environnementale et de la bioarchéologie (Clermont Ferrand, Toulouse, Nice), pôles sur lequel le CNRS investit par ailleurs en matière d'équipement ou de plateforme technique.

### **Principaux partenaires du CNRS dans ce domaine :**

Muséum d'Histoire Naturelle et Universités

IRD Institut de Recherche pour le Développement

INRA Institut National de la Recherche Agronomique

IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

DRAC Directions régionales des affaires culturelles

MAEE Ministère des Affaires Étrangères et Européennes

MEDAD Ministère de l'Écologie de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer

## **5 – SCIENCES PHYSICO-CHIMIQUES POUR LA CARACTÉRISATION DES ENVIRONNEMENTS ET DES SOCIÉTÉS DU PASSÉ**

Correspondances CNU : La Géochronologie et la Physico-chimie des archéo-matériaux se placent au sein des 16<sup>e</sup>, 32<sup>e</sup> et 33<sup>e</sup> sections pour le volet physico-chimique des recherches et des 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> sections en ce qui concerne les aspects Sciences Humaines.

### **Périmètre et thématiques spécifiques : les recherches en Science de la matière**

Les matériaux anciens ont enregistré une partie de leur histoire, qu'elle soit biologique, culturelle ou environnementale, au niveau de leur surface, de leur morphologie et de leur composition chimique. Leurs caractéristiques élémentaire, isotopique, moléculaire ainsi que leur structure microscopique, voire nanoscopique, sont ainsi des témoins précieux des comportements humains, des données environnementales et des relations hommes-milieux.

La recherche, la lecture et l'interprétation de ces informations sont le plus souvent tributaires de moyens analytiques lourds et onéreux et de temps de préparation et d'analyse conséquents. Elles reposent sur des savoirs et des compétences spécifiques qui prennent leur racine à l'interface de plusieurs disciplines relevant des sciences humaines et des sciences physico-chimique et naturaliste.

Au sein de la section 31, les recherches concernent plusieurs champs d'investigation distincts :

– les datations (U-Th,  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$ , OSL) des environnements et des cultures du Pléistocène (4 permanents) ;

– les rapports des isotopes stables chez les hommes et les animaux essentiellement dans la perspective de caractérisation des régimes alimentaires à l'Holocène (3 permanents) ;

– les marqueurs élémentaires et isotopiques des activités métallurgiques pré-, proto-historiques et historiques et l'étude des productions métalliques (2 permanents dont 1 recrutement en 2009) ;

– la caractérisation des matières organiques, dans la perspective de reconstruction des pratiques techniques, alimentaires et culinaires au Pléistocène supérieur et à l'Holocène (2 permanents) ;

– la caractérisation des matériaux céramiques afin d'appréhender la production, la diffusion et la fonction des céramiques au Proche-Orient (1 permanent).

## Acteurs et structuration du champ

Ces recherches sont actuellement menées en section 31 par un petit groupe (17). Il s'agit donc d'une communauté dynamique en plein essor et en pleine mutation (18) Très jeune, cette population sera peu affectée par l'évolution démographique immédiate si ce n'est en archéo-métallurgie (un départ en retraite en 2014) et en céramologie (un départ en retraite en 2015).

## Structuration scientifique

La structuration des recherches en science de la matière menées par des membres de la section 31 est majoritairement contrainte par deux facteurs : les **spécialisations techniques et méthodologiques dans le champ de la chimie analytique**, d'une part, et les

**caractéristiques des matériaux** considérés, d'autre part. Autrement dit, les acteurs des recherches à l'interface des sciences physico-chimique, naturelle et archéologique, sont spécialisés en fonction des gammes de matériaux étudiés (19) et des techniques d'analyse mises en œuvre (20).

De ce fait, les recherches menées dans ce domaine présentent bien souvent un caractère diachronique important : la connaissance fine de matériaux complexes comme les ossements qui sont des biomatériaux composites (organiques et inorganiques) permet par exemple d'aborder des problématiques qui couvrent toute l'histoire de l'exploitation de ce matériau par l'homme.

Cela étant, la multiplicité des problématiques (culturelle, biologique, environnementale, étude des processus d'altération, amélioration des procédés de conservation – restauration), alliée à la diversité des contextes culturels et environnementaux sur notre planète, se traduit également par des spécialisations sur des problématiques bien définies (les communautés qui s'intéressent aux chaînes opératoires ne sont pas les mêmes que celles qui reconstituent les régimes alimentaires ; celles qui étudient les matériaux archéologiques pour leur potentiel environnemental et culturel ne sont pas les mêmes que celles qui s'intéressent aux procédés de conservation-restauration, etc.) et sur des aires géo-chronologiques particulières (les métallurgies des cuivreux en Europe, les substances naturelles au Néolithique en Europe, les productions céramiques au Proche-Orient, etc.). Cette structuration des recherches par aire géographique s'explique en partie par la nécessité de référentiels spécifiques puisque les compositions et caractéristiques des matériaux diffèrent suivant les contextes environnementaux et donc les régions.

## Structuration institutionnelle

L'interdisciplinarité entre des domaines d'investigation aux objets, aux concepts et aux méthodes éloignés, mais dont la complé-

mentarité est fortement heuristique, a des conséquences directes sur l'organisation des recherches qui de fait se développent en des lieux différents : dans différents instituts du CNRS (INEE, INSHS, INC, INP notamment) ; à l'université aussi bien en faculté des sciences que de lettres, mais aussi dans des laboratoires patrimoniaux. Il en résulte une distribution des recherches sur tout le territoire national qui doit être prise en compte par les instances et organisée au mieux.

À l'heure actuelle, trois situations sont rencontrées en France, mais c'est également le cas dans d'autres pays, en Angleterre notamment :

1. Les recherches sont développées par un petit nombre de physico-chimistes relevant de l'institut de chimie ou de physique (voire INSU, etc.) en collaboration avec des unités INEE ou INSHS ;

2. Les recherches sont développées par un petit nombre de chercheurs, le plus souvent par des acteurs relevant de la section 31 (mais aussi de la section 32) ayant une double formation (n=12 pour la section 31), dans des unités INEE ou INSHS ;

3. Les recherches sont menées dans des unités hautement interdisciplinaires liées au patrimoine culturel (C2RMF, CRCC par exemple).

Dans un paysage en pleine mutation, ce dispositif de laboratoires est accompagné par la mise en place de plates-formes analytiques (UPS 3352 créée le 1<sup>er</sup> janvier 2010 – IPANEMA – Institut Photonique d'Analyse Non-destructive Européen des Matériaux Anciens) et de mise en réseau (RTP Archéométrie entre 2007 et 2009 puis réseau CAI-RN Compétences Archéométriques Interdisciplinaires – Réseau National porté par la MRCT à partir de 2010 ; GDR 3174 ChimARC entre 2008 et 2011, etc.). À cela s'ajoutent les programmes formalisés de recherche sous diverses formes qui financent en grande partie cette communauté (ERC, ANR, PNRCC du Ministère de la Culture et de la Communication, Projets région, etc.).

## **De l'interdisciplinarité et des modalités de publication**

Les modalités de publication en archéométrie ou archéosciences font appel à un large éventail de supports éditoriaux qui peuvent être rattachés à trois grands domaines : les disciplines-mères concernées (chimie analytique, science des matériaux, etc.) ; l'archéométrie à proprement parler (21) et archéologie (22). Les publications sont donc largement concentrées dans des revues internationales, ce qui s'explique par la force de la communauté anglo-saxonne, même si des ouvrages de synthèse, primordiaux pour la discipline, commencent à se multiplier.

Cette variété de modalités de diffusion des résultats était à signaler car cela implique une évaluation qui tienne compte de cette diversité des supports absolument indispensable au bon déroulement des recherches (23).

## **Perspectives scientifiques et organisationnelles**

### **Les forces et les faiblesses thématiques et humaines**

Le <sup>14</sup>C ne dispose probablement pas des dynamiques scientifiques observées ailleurs en Europe (Belfast, Oxford, Groningen, Poznan, Lecce, etc.) et le succès mitigé d'Artémis est probablement dû à l'absence de chercheurs dans ce domaine.

En ce qui concerne la caractérisation des matériaux, les deux secteurs les plus fragiles sont ceux liés aux productions céramiques et métalliques (modes d'acquisition et procédés intervenant dans les segments amont des chaînes opératoires) qui seront affectés par les premiers départs (1DR, 1CR) prévus en 2014 et 2015.

Dans ces domaines, la section doit se positionner vis-à-vis de la 18, de la 20 et de la 32.

Pour ce qui concerne la datation, il est absolument crucial de maintenir en section 31

un groupe significatif de dateurs qui maîtrisent parfaitement les conditions taphonomiques et les processus spécifiques à la formation des sites préhistoriques. L'organisation des moyens de datation en France doit être repensée dans le cadre d'un réseau national associant l'ensemble des instituts du CNRS concernés (INSHS, INEE, INSU...). La section doit soutenir, dans un tel cadre, le développement des analyses de cosmogéniques (Be, Cl, Al) qui s'avèrent être des voies très prometteuses pour la datation des séquences et événements naturels et anthropiques sur la très longue durée.

Le domaine des isotopes est largement sous-représenté en France, en comparaison des pays anglo-saxons, en regard de ses potentiels heuristiques. Outre les aspects qui concernent les régimes alimentaires (C, N), et qui ont en eux-mêmes vocation à être développés avec le soutien de la section 31, les études de marqueurs environnementaux (O, Sr) à partir de matériel humain ou animal doivent être soutenues dans la perspective de caractérisation des mobilités et des systèmes économiques.

La chimie dédiée à la caractérisation des archéo-matériaux organiques (résines, cires, goudrons, composés moléculaires caractéristiques des préparations alimentaires...) est un champ émergent très soutenu dans les pays anglo-saxons et qui devrait connaître un fort développement au cours des prochaines années. La section 31 offre un cadre interdisciplinaire pertinent pour l'accueil de nouvelles thématiques de ce champ.

La question de la caractérisation des archéomatériaux minéraux et des métaux est plus problématique. La communauté est en effet plus largement divisée entre les sections 31 et 32, et relève dans une moindre mesure de sections de l'INC (sections 13 et 15) et de l'INP (sections 5, 9 et 11). L'ensemble de ces sections, et principalement les sections 31 et 32, doivent donc envisager une prospective commune dans ce domaine.

Abstraction faite des matériaux comme l'obsidienne qui nécessitent une instrumentation lourde (e.g. LA-ICP-MS), la caractérisation des roches siliceuses est très largement inté-

grée aux démarches de techno-économie des industries lithiques, reposant en cela sur la généralisation des lithothèques de laboratoire, construites avec le partenariat de géologues et intégrées à un réseau national et européen qui gagnera à être mieux formalisé.

La caractérisation des roches tenaces constitue un enjeu d'importance (voir notamment les travaux de l'ANR-JADE) et pourrait bénéficier du développement de nouvelles méthodes de caractérisation (e.g. diffractométrie en faisceaux parallèles).

Ces deux aspects justifieraient le recrutement d'IR rompus aux méthodes de caractérisation physico-chimiques dans le cadre d'une plateforme mutualisée.

La caractérisation des matériaux céramiques est insuffisamment développée. Les recherches dans ce domaine manquent de visibilité, sans doute en raison de la concurrence passée entre le tout-chimie et le tout-pétrographie (24).

De manière assez logique, compte tenu des contextes chronologiques étudiés, les études sur la métallurgie sont très soutenues en section 32. Leur place en 31 a cependant été réaffirmée, sur des aspects qui touchent davantage aux impacts environnementaux. La prospective de ce champ devra être affinée dans le cadre du nouveau réseau CAI-RN portée par la MRCT.

Étant donné le fort investissement technique nécessaire, un manque cruel de personnels Techniciens et Ingénieurs dans ces domaines est un frein notable au développement des recherches et aux innovations techniques et méthodologiques indispensables.

Les concours Chercheurs 2009 et 2010 ont montré le dynamisme des recherches en archéo-métallurgie, domaine dans lequel la France est en train de gagner une place prépondérante et remarquée à l'échelle internationale. Les autres domaines présentent un vivier nettement moins fourni. Des bourses doctorales ou post-doctorales fléchées seraient un levier incitatif efficace pour faire émerger ou renforcer des thèmes primordiaux pour la compréhén-

sion des sociétés du passé et de leur environnement mais sensiblement délaissés en France, qu'il s'agisse de l'histoire des matières colorantes, des productions céramiques, des biomatériaux ou encore des substances organiques.

### **Quelques pistes organisationnelles**

Les recherches menées en sciences de la matière à l'interface avec l'archéologie sont caractérisées par un paysage fortement interinstitutionnel (plusieurs instituts du CNRS impliqués, importance des laboratoires du Ministère de la Culture et de la Communication, MNHN, Universités...) et une répartition des forces sur tout le territoire national (voir à ce propos l'état des lieux réalisé par le RTP Archéométrie en 2008).

Cet état de fait conduit à un constat : le risque est grand du morcellement des recherches, de l'isolement des chercheurs et de solutions de continuité entre les aspects complémentaires de ces recherches (sciences physico-chimiques *versus* sciences humaines et/ou environnementales).

Pour pallier ces risques, la structuration en réseaux et le développement des plates-formes, notamment à l'échelle régionale, sont cruciaux (25).

Au niveau des plates-formes, la situation est plus contrastée. La création d'IPANEMA, réalisée sans concertation suffisante avec les acteurs du domaine, nécessite maintenant un ancrage réel à l'interface des sciences humaines et des sciences physico-chimiques. De même, les fédérations en cours de réflexion dans différentes régions autour des sciences archéologiques devront être pensées en évitant de dissocier les compétences en sciences physico-chimiques de celles en sciences humaines. En particulier, sur des campus universitaires sur lesquels les infrastructures et les compétences analytiques existent déjà et où des chercheurs des instituts INC et / ou INP sont déjà investis dans ces thématiques, il s'agira de mutualiser les moyens et les savoir-faire plutôt que de créer de nouvelles infrastructures

coupées des savoir-faire techniques et méthodologiques *ex nihilo*. Dans le cas contraire, l'absence d'ancrage dans un domaine disciplinaire et la formation des jeunes générations dans un seul des domaines mis en jeu conduiraient à l'affaiblissement, voire la disparition de ces recherches nécessairement interdisciplinaires. Enfin, la transformation de structures importantes comme le C2RMF dont l'évolution menace les interactions fertiles CNRS – MCC, est fortement préoccupante.

L'ensemble de ces modifications du paysage de la recherche ne sont pas concertées et il apparaît primordial que ces évolutions se passent maintenant de façon cohérente en s'appuyant sur les réseaux de compétences existants.

### **Partenaires du CNRS dans ce domaine**

À l'intérieur du CNRS, cette communauté fortement interdisciplinaire est répartie sur plusieurs instituts du CNRS et plusieurs sections : sections 31 et 32 pour INEE et INSHS mais aussi sections 13 et 15 (INC), sections 5, 9 et 11 (INP), section 29 pour les questions de paléo-génétique (INSB).

Le Ministère de la Culture et de la Communication, à travers des laboratoires tels que le C2RMF, le CRCC et le LRMH en région parisienne ou encore le CICRP en région, est un des partenaires forts du CNRS dans le domaine considéré ici.

Même si les acteurs travaillant à l'interface des sciences archéologiques et physico-chimiques relèvent principalement du CNRS et du MCC, certaines universités jouent également un rôle important comme c'est le cas à Bordeaux par exemple.

## **6 – CONCLUSIONS**

En regard de la prospective de l'INSHS la contribution de la section 31 reste clairement

identifiée comme contribuant fondamentalement à la connaissance de l'histoire de l'homme et des sociétés du passé. Ses chercheurs et ses unités ont donc vocation à collaborer étroitement aux dispositifs fédératifs mis en place dans ce domaine (e.g. réseau des MSH).

En regard de la prospective de l'INEE, l'ensemble des composantes de la section 31 sont appelées à contribuer de façon forte aux axes identifiés lors des journées de Rennes : « Réponses aux changements globaux », « Artificialisation / Anthropisation des milieux », « Echelles temporelles de la biodiversité », « Écochimie » et aspects d'évaluation environnementale.

Au cours de la prochaine période les laboratoires de la section devront s'approprier les nouveaux outils d'observation, expérimentation et modélisation mis en œuvre par l'INEE : en particulier les sites et zones-ateliers, les Observatoires hommes-milieux. Ces outils, qui donnent aux pratiques de terrain une place centrale, sont particulièrement adaptés aux problématiques archéologiques et environnementales développées dans le cadre de la section.

En outre, plusieurs chantiers peuvent être envisagés, touchant à l'évolution des méthodes ou des organisations de recherche collective :

- une réflexion sur la mise en cohérence des dispositifs de recherche en **Géographie environnementale et paléo-environnement** (INEE- INSHS-INSU) ;

- un renforcement des dispositifs d'analyse fonctionnelle intégrée des pratiques humaines sur le milieu (**systèmes techniques, mise en forme des matériaux**) (INEE-INSHS-INS2I)

- une amélioration et une structuration des dispositifs d'**imagerie 3D**, en lien avec l'INS2I ;

- une réflexion large, interdisciplinaire et interinstitutionnelle (INEE-INSB), sur les apports de la **génomique** à la recherche sur les hommes et les environnements ;

- une amélioration de la visibilité, de la cohérence et de la qualité du dispositif de **datation** en France (INC, INEE, INP, INSHS, INSU ; MCC ; MAEE ; IRD) ;

- une réflexion sur les **politiques éditoriales et documentaires** prenant en considération les cultures de laboratoires SHS et les nécessités d'une évolution des pratiques d'**édition des Bases de données** (INEE- INSHS-INS2I).

Plusieurs de ces chantiers peuvent justifier la poursuite (e.g. Génomique, Archéométrie) ou la création de **RTP** (e.g. Datation, Géographie environnementale, Imagerie et applications 3D, Paléanthropologie évolutive).

L'ensemble doit accompagner une réflexion sur la mise en réseau national des compétences : constitution de plateformes techniques et mutualisation des ressources ; politique ambitieuse de recrutement d'ingénieurs et techniciens de la recherche et de formation permanente des chercheurs et ITA.

## **ANNEXE : LISTE DES STRUCTURES OPERATIONNELLES DE RECHERCHE ET DES RÉSEAUX**

### **LES CHERCHEURS DE LA SECTION 31 ET LEURS LABORATOIRES**

Fin 2010, la section 31 rassemblera 224 chercheurs titulaires, auxquels il convient d'ajouter 10 stagiaires recrutés lors du concours 2010, soit 234 chercheurs.

Les titulaires se distribuent au sein de 45 unités de recherche rattachées principalement (n=23), secondairement (n=14) ou non rattachées (n=8) à la section : 24 d'entre elles (23 UMR et 1 UPR), qui regroupent chacune 3 chercheurs ou plus de la 31 ou plus, rassemblent au total 194 chercheurs soit 87% des titulaires ; 21 autres unités, accueillant 1 à 2 chercheurs, rassemblent au total 30 chercheurs soit 13% des titulaires. 4 GDR sont également rattachés à la section.

Ces unités se répartissent en Île-de-France (n=13), en Provence-Alpes-Côte d'Azur (n=8), en Aquitaine (n=3), en Midi-Pyrénées (n=3), en Rhône-Alpes (n=5), en Languedoc-Roussillon (n=2), en Bretagne (n=1), en Bourgogne (2 unités à Dijon ; 7 chercheurs), en Franche-Comté (1 unité à Besançon ; 4 chercheurs), en Auvergne (1 unité à Clermont-Ferrand ; 3 chercheurs), en Alsace (1 unité à Strasbourg ; 1 chercheur), dans les Pays de la Loire (1 unité à Nantes ; 1 chercheur), en Normandie (1 unité à Caen ; 1 chercheur) et dans le Nord-Pas-de-Calais (1 unité à Villeneuve-d'Ascq ; 1 chercheur). En outre 3 chercheurs sont affectés à 2 unités basées à l'étranger (Dakar, Istanbul, Rome) ; il n'est pas tenu compte ici des MAD.

#### **ÎLE-DE-FRANCE ET RÉGION CENTRE**

13 unités, basées à Nanterre, Paris et Meudon, accueillent 94 chercheurs soit 42% des effectifs de

la section. 9 d'entre elles regroupent des effectifs significatifs de la 31 (de 3 à 11 chercheurs) ou très importants (UMR7041 : 23 chercheurs), tandis que 4 autres (UMR7179, UMR7208, UMR8185, UMR8586) n'hébergent qu'1 ou 2 chercheurs (26). D'ici 5 ans (fin 2015), certaines de ces unités seront pratiquement « intactes » (UPR2147, UMR7055, UMR7194, UMR7209, UMR8591), d'autre sévèrement touchées par les départs à la retraite avec des pertes variant entre 30 à 50% (UMR7041, UMR8096, UMR8546) voire 50 à 75% des effectifs chercheurs de la 31 (UMR7206, UMR9993).

En région parisienne, abstraction faite d'une UPR, les unités de recherche sont associées principalement aux Universités Paris 1, Paris 10 et au Muséum National d'Histoire Naturelle. La principale d'entre elles, du point de vue des effectifs CNRS-31, est bi-rattachée aux universités Paris 1 et Paris 10 qui vont probablement adhérer, au cours de la prochaine période, à des logiques de PRES/Campus distinctes. La section attire l'attention de la gouvernance sur cette situation qui pourrait être préjudiciable aux unités et aux chercheurs actuellement regroupés au sein de la MAE-René Ginouvès de Nanterre.

En région Centre, deux unités sont rattachées secondairement à la section 31 – Orléans (UMR5060) et Tours (UMR6173) – mais n'accueillent pas de chercheurs CNRS rattachés à la 31.

#### **PROVENCE – ALPES – CÔTE D'AZUR (DR12 ET DR20) : 8 UNITÉS, 30 CHERCHEURS**

Situées à Aix, Marseille et Nice, ces 8 UMR accueillent 13% des effectifs de la section. 3 d'entre elles (UMR6130, UMR6578 et UMR6636) regroupent des effectifs assez significatifs (5 à 10 chercheurs) tandis que les 5 autres n'accueillent qu'1 ou 2 chercheurs de la 31 (UMR6012, UMR6116, UMR6573, UMR6574, UMR6635). D'ici 5 ans (fin 2015), les effectifs des UMR 6130, 6578 et 6636 seront pratiquement « intacts ». Parmi les 7 chercheurs de la 31 « isolés », les 2 qui sont actuel-

lement rattachés aux UMR6012 et UMR6573, ainsi qu'1 chercheur de l'UMR6116, auront dépassé les 65 ans.

Les principales unités CNRS-31 de cette région sont rattachées aux universités Aix-Marseille I, Aix-Marseille II et Nice-Sophia Antipolis. Ces universités sont engagées dans des processus de regroupement au sein de deux PRES distincts (PRES Aix-Marseille – Campus d'excellence ; PRES Euro-méditerranéen). En termes d'effectifs CNRS-31, les deux pôles s'équilibrent et jouent des rôles distincts et complémentaires, notamment à l'international.

### **AQUITAINE (3 UNITÉS, 23 CHERCHEURS)**

3 unités basées à Talence et Pessac accueillent 23 chercheurs soit 10% des titulaires CNRS. La plupart (19) sont regroupés au sein de l'UMR5199 (PACEA) et 3 autres appartiennent à l'antenne bordelaise (CRP2A) du réseau IRAMAT (UMR5060) ; ces unités ont des missions distinctes et bien identifiées thématiquement et méthodologiquement. Enfin un chercheur est rattaché à une unité de la section 39 (UMR5185-ADES). PACEA et CRP2A sont parties prenantes du projet de Fédération des Sciences Archéologiques de Bordeaux qui associe le CNRS, le Ministère de la Culture et de la Communication et les Universités de Bordeaux 1 et Bordeaux 3.

Ce pôle va connaître au cours des 5 prochaines années une réduction très significative de ses effectifs (9 départs à la retraite prévisibles d'ici la fin 2015, soit plus du tiers).

### **MIDI PYRÉNÉES (3 UNITÉS, 23 CHERCHEURS)**

3 unités toulousaines de l'INEE accueillent 22 chercheurs soit ca.10% des titulaires CNRS de la section 31 : 17 au sein de TRACES (UMR5608),

3 au sein d'AMIS (FRE2960) et 3 autres au sein de GEODE (UMR5602). Ce pôle, peu affecté par les départs des 5 prochaines années (4/22), recouvre l'ensemble des thématiques et disciplines de la section 31. Les équipes toulousaines sont engagées dans un processus de construction d'une Maison de l'Archéologie au sein de laquelle les unités de la 31 doivent jouer un rôle significatif.

## **RHÔNE-ALPES ET AUVERGNE (6 UNITÉS, 18 CHERCHEURS)**

5 unités à Lyon, Le Bourget-du-Lac et Grenoble rassemblent 15 chercheurs de la section. Les deux-tiers se trouvent à Archéorient (UMR5133-MOM) ; les 4 autres sont rattachés à EDYTEM-UMR5204 (n=2), à EVS-UMR5600 (n=1), au LTHE de Grenoble – UMR5564 (n=1) et à l'unité Archéologie et Archéométrie, UMR5138-MOM (n=1).

D'ici 5 ans, ce dispositif risque d'être fragilisé avec le départ de 4 chercheurs d'Archéorient très engagés dans les recherches archéologiques au Proche et Moyen-Orient. En revanche la composante paléo-environnementale est très solide.

En Auvergne, 3 jeunes géographes environnementalistes et géoarchéologues du CNRS sont regroupés au sein de GEOLAB-UMR6042 à Clermont-Ferrand.

Cette inter-région apparaît de fait comme dotée d'un fort potentiel pour le développement de la géographie environnementale : 3 chercheurs à l'UMR6042, 2 à l'UMR5133, 2 à l'UMR5204, 1 à l'UMR5564, 1 à l'UMR5600 y représentent la moitié des forces vives de la section 31 dans ce domaine.

## **LANGUEDOC-ROUSSILLON**

2 unités basées à Lattes et Montpellier regroupent 10 chercheurs. 9 se trouvent au sein de l'unité « Archéologie des sociétés méditerranéen-

nes» UMR5140, 1 au sein du CBAE-UMR5059. Le tiers des effectifs de l'UMR5140 devrait partir à la retraite d'ici la fin 2012, ce qui fragilisera la composante protohistorique de cette unité qui joue un rôle important dans cette région pour l'articulation des politiques du CNRS, de l'université, de l'INRAP et du MCC.

## **BRETAGNE – PAYS DE LA LOIRE – NORMANDIE (3 UNITÉS, 11 CHERCHEURS)**

À Rennes, l'UMR6566 regroupe 9 chercheurs de la section 31 (2 d'entre eux seront sur le départ d'ici 5 ans). L'unité, interdisciplinaire, présente une forte cohérence qui s'appuie notamment sur son ancrage interrégional et son ouverture à l'international (Grand Nord, Europe du Nord-ouest); elle est identifiée historiquement comme un des acteurs majeurs des sciences expérimentales appliquées à l'archéologie.

Dans cette inter-région, 1 chercheur est également présent au LETG de Nantes (UMR6554) et un autre au M2C de Caen (UMR6143). Tous deux devaient être à la retraite avant 2015.

## **ALSACE – BOURGOGNE – FRANCHE-COMTÉ (4 UNITÉS, 12 CHERCHEURS)**

À Dijon, l'UMR5594-ArTeHis qui regroupe 6 archéologues (culturalistes ou bioarchéologues) principalement tournés vers la Protohistoire connaîtra un seul départ à la retraite au cours des toutes prochaines années. L'UMR5210-CRC de Dijon accueille également une jeune climatologue de la section.

À Besançon, l'UMR6249-Chrono-environnement regroupe 4 climatologues et paléo-environnementalistes de la section 31.

À Strasbourg, l'UMR7044 héberge une bioarchéologue.

L'antenne de Belfort-Montbéliard de l'UMR5060, rattachée à la 31, n'accueille pas de chercheurs CNRS de la section.

Cette inter-région possède un très fort potentiel en protohistoire et paléo-environnement qui ne sera que très peu affecté par les départs à la retraite d'ici 2015.

## **AUTRES IMPLANTATIONS**

3 chercheurs sont implantés dans des UMIFRE ou UMI. Deux d'entre eux (en anthropologie biologique) devraient être à la retraite d'ici 2015.

## **UNITÉS EN RATTACHEMENT PRINCIPAL À LA SECTION 31**

UPR2147 « Dynamique de l'évolution humaine : individus, populations, espèces »

Anne-Marie Guihard-Costa  
CNRS Paris  
INEE, INSHS, INSB

FRE2960 « Anthropologie moléculaire et imagerie de synthèse » (AMIS)

Éric Crubézy  
Toulouse 3  
INEE (*RS section 29*)

UMI3189 « Environnement, santé, sociétés » (ESS)

Gilles Boëtsch  
Dakar, Bamako Aix-Marseille 2, CNRST-Ouagadougou  
INSHS, INSB (*RS sections 39 et 38*)

UMR5059 « Centre de bio-archéologie et écologie » (CBAE)

Christopher Carcaillet  
Montpellier 2, EPHE  
INEE, INSHS, INSU (*RS section 20*)

UMR5133 « Archéorient – Environnements et sociétés de l'Orient ancien »

Pierre Lombard

- Lyon 2  
INSHS, INEE (*RS section 32*)
- UMR5140 « Archéologie des sociétés méditerranéennes »  
Pierre Garmy  
Montpellier 3, MCC, INRAP  
INSHS, INEE (*RS section 32*)
- UMR5199 « De la préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie »  
Jacques Jaubert  
Bordeaux 1, MCC  
INEE, INSHS
- UMR5204 « Environnements, dynamiques et territoires de la montagne » (EDYTEM)  
Jean-Jacques Delannoy  
Chambéry  
INEE, INSHS, INSU
- UMR5594 « Archéologie, cultures, sociétés »  
Daniel Russo  
Dijon, MCC  
INSHS (*RS section 32*)
- UMR5608 « Travaux et recherches sur les cultures, les espaces et les sociétés » (TRACES)  
Michel Barbaza  
Toulouse 2, MCC  
INEE, INSHS (*RS section 32*)
- UMR6042 « Laboratoire de Géographie physique et environnementale » (GEOLAB)  
Jean-Luc Peiry  
Clermont-Ferrand 2, Limoges  
INEE, INSHS
- UMR6130 « Centre d'études Préhistoire, Antiquité, Moyen Age » (CEPAM)  
Didier Binder  
Nice Sophia Antipolis  
INEE, INSHS (*RS section 32*)
- UMR6249 « Chrono-environnement »  
Hervé Richard  
Besançon  
INEE, INSB, INSHS, INSU (*RS sections 32, 29 et 20*)
- UMR6566 « Centre de recherches en archéologie, archéosciences, histoire » (CREAAH)  
Dominique Marguerie  
Rennes 1, MCC, Nantes, Rennes 2  
INEE, INSHS (*RS section 32*)
- UMR6578 « Anthropologie bio-culturelle »  
Michel Signoli  
Aix-Marseille 2, ESF Alpes-Méditerranée  
INEE, INSHS
- UMR6636 « Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique » (LAMPEA)  
Robert Chenorkian  
Aix-Marseille 1, Grenoble 1, MCC, IRD  
INEE, INSHS
- UMR7055 « Préhistoire et technologie »  
Jacques Pelegrin  
Paris 10  
INSHS, INEE
- UMR7194 « Histoire naturelle de l'Homme préhistorique »  
Christophe Falguères  
MNHN (Paris, Les Eyzies-de-Tayac)  
INEE, INSHS
- UMR7206 « Éco-Anthropologie et ethnobiologie »  
Serge Bahuchet  
MNHN (Paris, Bourg-en-Bresse, Brunoy)  
INEE, INSB, INSHS (*RS sections 29, 38 et 27*)
- UMR7209 « Archéozoologie, archéobotanique : sociétés, pratiques, environnements »  
Jean-Denis Vigne  
MNHN (Paris)  
INEE, INSHS (*RS section 32*)
- UMR8096 « Archéologie des Amériques » (ARCHAM)  
Véronique Darras  
Paris 1  
INEE, INSHS
- UMR8591 « Laboratoire de géographie physique – Pierre Birot » (LGP)  
Catherine Kuzucuog̃;diac&lun  
Paris 1, Paris 12, INRAP  
INEE, INSHS
- UMR9993 « Centre de recherches archéologiques Indus – Baluchistan – Asie centrale et orientale »  
Olivier Lecomte  
MCC  
INSHS (*RS section 32*)

## UNITÉS EN RATTACHEMENT SECONDAIRE À LA 31

UMR5060 « Institut de recherche sur les archéo-  
matériaux »  
Bernard Gratuze  
Bordeaux 3, Orléans, Belfort-Montbéliard  
INSHS, INC (*RP section 32; autres RS sections  
5, 19*)

UMR5138 « Archéométrie et archéologie : ori-  
gine, datation et technologie des matériaux »  
Nicolas Reveyron  
Lyon 2, Lyon 1  
INSHS, INEE (*RP section 32*)

UMR5185 « Aménagement, développement,  
environnement, santé, sociétés » (ADES)  
Guy Di Meo  
Bordeaux 3, Bordeaux 2  
INSHS, INEE (*RP section 39*)

UMR5210 « Centre de recherches en climatolo-  
gie » CRC  
Bernard Fontaine  
Dijon  
INEE, INSU (*RP section 19*)

UMR5600 « Environnement, ville, société » EVS  
Paul Arnould  
Lyon 3, Lyon 2, Saint-Etienne, INSA, ECNTPE,  
ENS LSH  
INEE, INSHS (*RP section 39*)

UMR5602 « Géographie de l'environnement »  
GEODE  
Jean-Paul Métailie  
Toulouse 2  
INEE, INSHS (*RP section 39*)

UMR6116 « Institut méditerranéen d'écologie et  
paléoécologie » IMEP  
Thierry Taton  
Aix-Marseille 3, Aix-Marseille 1, Avignon, IRD  
INEE, INSB, INSHS, INSU (*RP section 20; autre  
RS section 29*)

UMR6173 « Cités, territoires, environnement et  
sociétés » CITERES  
Corinne Larrue  
Tours

INSHS, INEE (*RP section 39; autre RS sec-  
tion 32*)

UMR6573 Centre Camille Jullian – Archéologie  
méditerranéenne et africaine (CCJ)  
Dominique Garcia  
Aix-Marseille 1  
INSHS (*RP section 32*)

UMR6574 Centre de recherche et de documen-  
tation sur l'océanie (CREDO)  
Laurent Dousset  
Aix-Marseille 1, EHESS  
INSHS (*RP section 38*)

UMR6635 « Centre européen de recherche et  
d'enseignement de géosciences de l'environ-  
nement » (CEREGE)  
Nicolas Thouveny  
Aix-Marseille 3, Aix-Marseille 1, IRD, Collège  
de France  
INSU, INEE, INSHS (*RP section 18; autres RS  
sections 20 et 19*)

UMR7041 « Archéologies et Sciences de l'Anti-  
quité »  
Anne-Marie Guimier-Sorbets  
Paris 10, Paris 1, MCC  
INSHS (*RP section 32*)

UMR7044 « Étude des civilisations de l'Anti-  
quité : de la Préhistoire à Byzance »  
Dominique Beyer  
UDS-UHA, MCC  
INSHS (*RP section 32*)

UMR7179 « Mécanismes adaptatifs : des orga-  
nismes aux communautés »  
Martine Perret  
MNHN  
INEE, INSB (*RP section 29; autres RS sections  
20 et 27*)

## UNITÉS NON RATTACHÉES À LA SECTION MAIS ACCUEILLANT 1 OU 2 CHERCHEURS DE LA 31

UMR5564 Laboratoire d'étude des transferts en  
hydrologie et environnement (LTHE)

Thierry Lebel

Grenoble 1, Institut polytechnique, IRD  
INSU, INEE, INSB (*sections 20, 19*)

UMR6012 Études des structures, des processus  
d'adaptation et des changements de l'espace  
(ESPACE)

Christine Voiron

Nice, Avignon, Aix-Marseille 1, Aix-Marseille 2  
INSHS, INEE (*section 39*)

UMR6143 Laboratoire de Morphodynamique  
continentale et côtière (M2C)

Frank Levoy

Caen, Rouen

INSU, INEE (*sections 20, 18, 19 et 10*)

UMR6554 Littoral, environnement, télédétection  
et géomatique (LETG)

Marc Robin

Nantes, Brest, Rennes 2, Caen

INSHS, INEE (*section 39*)

UMR7208 Biologie des organismes et écosystèmes  
aquatiques

Sylvie Dufour

MNHN (Paris, Concarneau, Dinard), IRD (Marseille)

INEE, INSB (*sections 29, 26*)

UMR8185 Espace, Nature et Culture

Jean-Paul Amat

Paris 4, Paris 8

INSHS, INEE (*section 39*)

UMR8546 Archéologies d'Orient et d'Occident  
et Sciences des textes (AOROC)

Dominique Briquel

ENS Paris

INSHS (*section 32*)

UMR8586 Pôle de recherche pour l'organisation  
et la diffusion de l'information géographique  
(PRODIG)

Thierry Sanjuan

Paris 1, Paris 7, EPHE, IRD

INEE (*section 39*)

## GROUPEMENTS DE RECHERCHE

GDR2517 Regards interdisciplinaires sur les  
activités et techniques agricoles anciennes et  
préindustrielles

Patricia Anderson (UMR6130)

CNRS, Nice, CNAM Paris, EHESS, Paris 10, Paris  
1, IRD, École Centrale-Lyon, ENI-Saint-Étienne  
INEE (*sections 31 et 38*)

GDR2655 Énergétique et adaptation des homi-  
nides: Alimentation, locomotion, langage,  
reproduction

Gilles Bérillon (UPR2147)

CNRS

INEE (*section 31*)

GDR3062 Mutations polaires

Madeleine Griselin (UMR6049)

CNRS, Besançon, MNHN

INSHS, INEE (*sections 39, 31 et 38*)

GDR3174 Bio-géo-physico-chimie des archéo-  
matériaux et des biens Culturels (ChimArc)

Martine Regert (UMR6130)

CNRS, MCC

INC, INSHS (*sections 13 et 31*)

GDR3267 L'homme et sa diversité: dynami-  
ques évolutives des populations actuelles  
(EVOLPOP)

Anne-Marie Guihard-Costa (UPR2147)

CNRS, IRD, Aix-Marseille 2, Bordeaux 1,  
MNHN

INEE (*section 31*)

GDR3353 Agroécosystèmes, agrobiodiversités  
et environnement. Domestication et innova-  
tions (MOSAÏQUE)

Yidiz Thomas (CEFE)

CNRS, Montpellier 2, Montpellier 3, Lyon 2,  
MNHN, Rennes 1, Nice, Paris 10, IRD, INRA,  
CIRAD, SUP-AGRO

INEE (*sections 29, 31 et 45*)

## Notes

(1) CNU : section 20 « Anthropologie, Ethnologie, Préhistoire » ; section 21 « Histoire et archéologie des mondes anciens et des mondes médiévaux ; histoire de l'art » ; section 23 « Géographie physique, humaine, économique et régionale » ; section 26 « Milieux denses et matériaux » ; section 32 « Chimie organique, minérale, industrielle » ; section 33 « Chimie des matériaux » ; section 36 « Terre solide : géodynamique des enveloppes supérieures, paléo-biosphère » ; section 67 « Biologie des populations et écologie » ; section 68 « Biologie des organismes ».

(2) Pour comparaison environ un tiers seulement des ethnologues de cette section appartient à des UMR.

(3) Les ITA, bien que participant activement (pour une partie d'entre eux tout du moins) au travail de recherche – particulièrement en section 31 – sont rattachés de fait à la section principale de leur unité. L'état des lieux présenté ici fait donc abstraction de nombre d'agents affectés à une unité non 31, pourtant associés à des équipes dont la problématique est ancrée dans cette section.

(4) Se pose notamment la question de l'évolution possible des métiers des personnels de la BAP D – branche dédiée aux sciences humaines et sociales – et celle de l'augmentation probable des recrutements d'agents en BAP A (sciences du vivant), BAP qui représente pour l'heure 11 % des ITA de la section 31.

(5) Il est à noter la forte proportion de techniciens (proportion nettement supérieure au taux de l'ensemble des SHS : 26 %).

(6) Cette discipline rompt avec l'étude traditionnelle des sépultures anciennes qui a longtemps privilégié les architectures et les mobiliers d'accompagnement au détriment des restes humains et place délibérément le défunt au centre de son étude en se fondant sur une lecture dynamique des dépôts funéraires.

(7) À une époque où la parcellisation des savoirs et l'hyperspécialisation de la recherche commencent à atteindre leurs propres limites d'efficacité, le développement d'un champ disciplinaire par nature *ouvert* à tous les aspects de la diversité biologique humaine, dans le temps et dans l'espace, s'avère particulièrement important sur le plan conceptuel, comme sur le plan productif de la recherche.

(8) Les éléments constitutifs de ces réseaux pourraient être des projets scientifiques communs validés et des enseignements partagés. Ils pourraient inclure également un renforcement de la politique de diffusion scientifique grâce à des revues gérées collectivement.

(9) Selon que les chercheurs développent des aspects plus spécifiquement biologiques ou plutôt à l'interface biologie/culture.

(10) La section 31 a recruté un chercheur sur ces thématiques en 2009 et en a classé un parmi les premiers admissibles en 2010.

(11) Naturellement, pendant la même période, les principales thématiques (paléoanthropologie évolutive, archéo-thanatologie, génétique et paléo-génétique) verront aussi le départ de personnalités scientifiques incontournables ayant œuvré au développement de ces thématiques et à leur rayonnement international.

(12) Il convient d'inciter les chercheurs à s'impliquer dans les formations initiales, dès la Licence, et d'investir l'ensemble des

filières de Lettres ou de Sciences où nos questionnements peuvent trouver un écho.

(13) Ce champ étant également traité au sein de la section 32.

(14) Une analyse commune devra être réalisée avec la section 32 qui accueille une partie des spécialistes de l'âge du Fer.

(15) Plusieurs enseignants-chercheurs en préhistoire et protohistoire sont rattachés à la section 21 du CNU ; ils n'ont pas pu être pris en compte dans ce rapport.

(16) Pour ne pas dire l'essentiel si l'on considère certaines disciplines bien spécifiques directement en prise avec la recherche archéologique (anthracologie, carpologie par exemple)

(17) Une grande partie a été recrutée dans les années 2000 (1 par an en 2001, 2002, 2003, 2006, 2008 et 2009). Deux ont récemment changé d'affectation, 2 DR quittant la région parisienne (1 vers Bordeaux, l'autre vers Valbonne)

(18) 9 changements de situation depuis 2001 pour un total de 12 chercheurs auxquels s'ajoute un détachement.

(19) Les métaux ferreux, cuivreux, les verres, les ossements, les céramiques, les substances naturelles organiques, etc.

(20) Spectroscopies vibrationnelles, phénomènes de diffraction, d'absorption, méthodes d'observation, techniques séparatives, structurales, etc.

(21) Revue d'Archéométrie – Archéosciences au niveau national, *Archaeometry*, *Journal of Archaeological Science*, *Journal of Cultural Heritage*, *Studies in Conservation* à l'international

(22) *Antiquity* par exemple.

(23) Recherches qui permettent non seulement de développer des méthodologies spécifiques mais aussi d'aborder des problématiques clés de l'histoire de l'humanité et des relations hommes-milieu

(24) Comme pour les industries lithiques, une caractérisation des matériaux est naturellement incluse dans les démarches de description des chaînes opératoires ; si elle permet d'apprécier l'ampleur des variabilités et d'identifier des pratiques culturelles, elle ne répond que de façon très insuffisante à la problématique des approvisionnements. Ici un poste de chercheur serait nécessaire pour reconstruire ce champ délaissé.

(25) L'organisation en réseaux (accès facilité aux appareillages du réseau, circulation des étudiants, doctorants et post-doctorants entre différents laboratoires, cotutelle de thèse, etc.) a déjà montré son efficacité au niveau des RTP et des GDR et le nouveau réseau CAI-RN (Compétences Archéométries Interdisciplinaires – Réseau National) créé en 2010 au sein de la MRCT sera à n'en pas douter un outil efficace. Seul le soutien des institutions à ce type de structures permettra le maintien d'une formation interdisciplinaire auprès des étudiants qui pourront bénéficier des techniques, compétences et savoir-faire complémentaires des acteurs du réseau et le développement d'une interdisciplinarité s'appuyant sur des fondamentaux forts et une complémentarité efficace entre problématiques et méthodes mises en œuvre.

(26) Ils seront pour la plupart à la retraite en 2015.



# MONDES ANCIENS ET MÉDIÉVAUX

*Présidente de la section*

Véronique GAZEAU

*Membres de la section*

Nicole BELAYCHE

Katell BERTHELOT

André BINGGELI

Sophie BOUFFIER

Catherine BRENIQUET (2009)

Marc BOMPAIRE

Patrice BRUN (2009)

Jean-Yves EMPEREUR

Bruno FAJAL

Alessia GUARDASOLE

Nelly MARTIN

Sophie MÉTIVIER

Cécile MICHEL

Marie Anne POLO DE BEAULIEU

François QUEYREL

Christine RENDU

Agnès ROUVERET

Pierre-Yves SAILLANT

Arnaud SUSPÈNE

Henri TRÉZINY

## 1 – INTRODUCTION

### 1.1 AXES PRINCIPAUX

Dans la brochure du CNRS mise à disposition des nouveaux entrants 2010, p. 1, il est fait mention des propos d'Alain Fuchs : « Fait assez rare pour être souligné, le CNRS couvre l'ensemble des champs de la recherche, les sciences humaines et sociales, la biologie, l'ingénierie, la physique, la physique des particules, les mathématiques, la chimie, les sciences de l'Univers, l'écologie et l'environnement. Cette diversité fait sa richesse et son originalité ». Cette citation qui met à la meilleure place les sciences humaines et sociales à l'heure où le « Rapport d'étape » du « Conseil pour le Développement des Humanités et des Sciences sociales » (CDSHS) en date du 14 janvier 2010, intitulé « Pour des sciences humaines et sociales au cœur des universités » s'en prend assez violemment à l'INSHS, défendu par son ex-directeur Bruno Laurieux, nous encourage à dresser non pas un bilan exhaustif – l'exercice requerrait davantage de temps et de moyens –, mais à faire valoir la force et la richesse de la recherche en section 32, sans oublier d'en souligner les faiblesses. Une partie du rapport repose sur l'enquête que les membres de la section ont lancée au début du mandat sur les spécialités et compétences des chercheurs relevant de la 32.

Les champs d'étude de la section 32 intitulée «Mondes anciens et médiévaux» se rapportent aux sciences de l'Antiquité, pour les cultures utilisant l'écriture ou connues par des sources écrites, et du Moyen Âge ; ils concernent les grands ensembles disciplinaires que sont l'archéologie, l'histoire, la philologie, l'histoire de l'art, la musicologie dans une aire géographique planétaire (voir *infra*).

Les scientifiques rattachés à la section 32 constituent un ensemble unique par sa maîtrise des diverses échelles du temps et de l'espace, son expertise d'élaboration de tous les types d'objets-sources (données archéologiques, textes et représentations figurées sur tous supports), et sa capacité à enquêter sur tout l'éventail des SHS – depuis l'érudition la plus pointue appuyée désormais sur des techniques numériques jusqu'aux recherches ouvrant sur des modélisations ancrées sur la linguistique et les sciences politiques, économiques et sociales.

## 1.2 PRÉAMBULE

La réalisation d'un rapport de conjoncture après seulement 18 mois d'exercice de la section, dans la période de changements profonds dans l'organisation du CNRS en dix instituts thématiques et la signature du décret Contrat d'objectifs du 19 octobre 2009, s'avère totalement prématurée. Même si cet exercice relève des compétences des sections du CoNRS, les délais imposés le rendent très difficile à réaliser. N'étant plus en charge de l'évaluation des unités de recherche et étant désormais tributaire des évaluations sommaires de l'AERES, le CoNRS ne peut plus avoir la même vision globale qu'auparavant sur l'organisation de la recherche sur les mondes anciens et médiévaux. Son mandat est aussi le premier pour lequel il n'y a pas d'archéologue issu du Ministère de la Culture et de la Communication. Enfin, plusieurs observations effectuées par le rapport de conjoncture du mandat 2004-2008 demeurent valables et les rédacteurs du présent rapport n'hésitent pas à y renvoyer (équipements de la recherche et moyens de

diffusion, RTP, centres de compétences numériques, plateformes technologiques, p. 655-656).

## 2 – ACTEURS ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE EN SECTION 32

### 2.1 LES UNITÉS DE RECHERCHE

Il y a 35 formations qui ont actuellement un rattachement principal en section 32 ; elles correspondent à 1 ERL (il s'agit de l'ex UMR 7002 «Moyen Âge» de Nancy transformée en équipe recherche labellisée pour 4 ans à partir de 2008), 1 FR (MOM, Lyon), 21 UMR, 1 UPR (IRHT), 1 UMS (MSH Dijon), 10 USR dont 5 sont des unités de recherche opérationnelles à l'étranger (Alexandrie, Beyrouth-Damas-Amman, Istanbul, Karnak, Naples). Les unités à l'étranger ont été transformées en USR entre 2007 et 2010, deux d'entre elles sont des UMIFRE (IFPO et IFEA). La FRE 3119 (CRAHAM-Caen) a été transformée en UMR 6273. Le Centre Louis-Gernet, le Centre Glotz et l'EA Phéacie ont été réunis au sein de l'UMR 8210 (AnHiMA) au 01/01/2010. L'UMR???? a été intégrée à l'unité CITERES (Tours). L'UMR 8152 (Etat, religion et société dans l'Égypte ancienne et en Nubie) a rejoint l'UMR 8167 (Orient et Méditerranée). L'UMS 2763 (Applications documentaires et numériques en histoire de l'art) a été fermée au 31/12/2007.

#### Liste des unités

ERL 7229  
Équipe de recherche de médiévistique – DRAELANTS – Nancy

FR 538  
Maison de l'Orient et de la Méditerranée – Jean Pouilloux (MOM) – BOUCHARLAT – Lyon

- UMR 5060  
Institut de recherche sur les archéomatériaux (IRAMAT) – GRATUZE – Orléans, Bordeaux, Belfort
- UMR 5136  
France méridionale et Espagne : histoire des sociétés du Moyen Âge à l'époque contemporaine (FRA.M.ESPA) – OLIVIER – Toulouse
- UMR 5138  
Archéométrie et archéologie : Origine, Datation et Technologies des matériaux – REVEYRON – Lyon
- UMR 5189  
Histoire et sources des mondes antiques (HiSoMA) – DECOURT – Lyon
- UMR 5607  
Ausonius : Institut de recherche sur l'Antiquité et le Moyen Âge (IRAM) – FROMENTIN – Bordeaux
- UMR 5648  
Histoire et archéologie des mondes chrétiens et musulmans médiévaux – MENJOT – CHIFFOLEAU – Lyon
- UMR 6125  
Textes et documents de la Méditerranée antique et médiévale (Centre Paul-Albert Février) – DORIVAL – Aix-en-Provence
- UMR 6223  
Centre d'études supérieures de civilisation médiévale (CESCM) – TREFFORT – Poitiers
- UMR 6273  
Centre Michel de Boüard. Centre de recherches archéologiques et historiques anciennes et médiévales (CRAHAM) – BAUDUIN – Caen
- UMR 6572  
Laboratoire d'Archéologie Médiévale Méditerranéenne. (LAMM) – AMOURIC – Aix-en-Provence
- UMR 6573  
Centre Camille Jullian – Archéologie méditerranéenne et africaine (CCJ) – GARCIA – Aix-en-Provence
- UMR 7041  
Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) – GUIMIER-SORBETS – Nanterre
- UMR 7044  
Étude des civilisations de l'Antiquité : de la pré-histoire à Byzance – BEYER – Strasbourg
- UMR 7192  
Proche-Orient, Caucase, Iran : diversités et continuités – DURAND – Paris
- UMR 7528  
Mondes iranien et indien – HUYSE – Ivry-sur-Seine
- UMR 8164  
Histoire, archéologie, littératures des mondes anciens, Institut de papyrologie et d'égyptologie (HALMA-IPEL) – DEREMETZ – Lille
- UMR 8167  
Orient et Méditerranée – CHEYNET – Ivry-sur-Seine
- UMR 8210  
Anthropologie et Histoire des Mondes Antiques (AnHiMA) – DE POLIGNAC – Paris
- UMR 8546  
Archéologies d'Orient et d'Occident (AOROC) – BRIQUEL – Paris
- UMR 8584  
Laboratoire d'Études sur les Monothéismes (LEM) – BOULNOIS – Villejuif
- UMR 8589  
Laboratoire de Médiévisologie Occidentale de Paris (LAMOP) – FELLER – Paris
- UMS 2739  
Maison des Sciences de l'Homme de Dijon (MSHDijon) – WOLIKOW – Dijon
- UPR 841  
Institut de recherche et d'histoire des textes (IRHT) – EDDE – Paris, Orléans
- USR 710  
L'année épigraphique – PERRIN – Paris
- USR 3125  
Maison méditerranéenne des sciences de l'Homme – MARIN – Aix-en-Provence
- USR 3131  
Institut Français d'Études Anatoliennes (IFEA-Istanbul-Georges-Dumézil) – SENI
- USR 3133  
Centre Jean Bérard-Naples – BRUN

USR 3134  
Centre d'Études Alexandrines (CEALEX-Alexandrie) – EMPEREUR

USR 3135  
Institut Français du Proche-Orient (IFPO-Damas) – BURGAT

USR 3155  
Institut de recherche sur l'architecture antique (IRAA) – ROBERT – Aix-en-Provence

USR 3172  
Centre Franco-Égyptien d'Étude des Temples de Karnak (CFEETK) – THIERS

USR 3224  
Centre de Recherche sur la Conservation des Collections (CRCC) – LAVEDRINE – Paris

USR 3225  
Maison René-Ginouvès, Archéologie et Ethnologie – ROUILLARD – Nanterre

Il y a également 37 formations des sections 31, 33, 34, 35, 38 et 39 qui ont un rattachement secondaire en section 32; certaines d'entre elles comportent un nombre conséquent de chercheurs évalués par cette section.

Enfin, plusieurs **GDR** sont également rattachés à la section 32 :

GDR 2513  
Sources, acteurs et lieux de la vie religieuse à l'époque médiévale (SALVE) (2002-2010) – MILLET

GDR 2538  
Réseau international d'études et de recherches achéménides (Achemenet) (2002-2010) – BRIANT

GDR 2643  
*Ars scribendi* : diachronie des formes et genres littéraires dans le monde romain (2003-2011) – BARATIN

GDR 3177  
Diplomatique (créé le 1.1.2008) – BERTRAND

GDR3279  
Théâtre antique : textes, histoire et réception (créé le 1.1.2009) – LE GUEN

Certains GDR ne sont plus en activité à la fin 2009 :

GDR 2136  
France-îles Britanniques (fin en 2007) – GENET

GDR 2319  
Cultes et sanctuaires dans la Tunisie antique (2001-2009) – BARATTE

GDR 2378  
Séminaire interdisciplinaire de recherches sur l'Espagne médiévale (SIREM) (2001-2009) – MARTIN

GDR 2903  
Archéométaballurgie dans le bassin méditerranéen : les mondes grecs et égyptiens (AMBM) (2005-2009) – FLUZIN

En rattachement secondaire à la section 32 figurent également plusieurs GDR.

## 2.2 RÉPARTITION DES UNITÉS PAR DISCIPLINES

Toutes les unités fondent leurs travaux à la fois sur les sources textuelles et archéologiques.

– Archéométrie, Architecture, espaces et environnement : UMR 5060 (IRAMAT), UMR 5138 (Archéométrie et archéologie), USR 3155 (IRAA).

– Archéologie, Histoire et Histoire de l'art métropolitaines et européennes antiques : UMR 5138 (Archéométrie et archéologie), UMR 5607 (IRAM), UMR 6273 (CRAHAM), UMR 6573 (CCJ), UMR 7041 (ArScAn), UMR 8164 (HALMA-IPEL), UMR 8210 (AnHiMA), UMR 8546 (AOROC), USR 3155 (IRAA).

– Archéologie, Histoire et Histoire de l'art métropolitaines et européennes médiévales : UMR 5136 (FRA.M.ESPA), UMR 5607 (IRAM), UMR 6223 (CESCM), UMR 6273 (CRAHAM), UMR 6572 (LAMM), UMR 8589 (LAMOP), UPR 841 (IRHT).

– Archéologie, Histoire et Histoire de l'art méditerranéennes : FR 538 (MOM), UMR 6273 (CRAHAM), USR 3125 (MMSH), UMR 5136 (FRA.M.ESPA), UMR 5189 (HiSoMA), UMR

5607 (IRAM), UMR 5648 (CIHAM), UMR 6125 (CPAF), UMR 6223 (CESCM), UMR 6572 (LAMM), UMR 6573 (CCJ), UMR 7041 (ArScAn), UMR 7044 (Étude des civilisations de l'Antiquité), UMR 8164 (HALMA-IPEL), UMR 8167 (Orient et Méditerranée), UMR 8210 (AnHiMA), UMR 8546 (AOROC), UMR 8589 (LAMOP), UPR 841 (IRHT), USR 3131 (IFEA), USR 3133 (Centre Jean Bérard), USR 3134 (CEALEX), USR 3155 (IRAA), USR 3172 Temples de Karnak (CFEETK).

– Archéologie, Histoire et Histoire de l'art du Proche-Orient : FR 538 (MOM), UMR 5189 (HiSoMA), UMR 5607 (IRAM), UMR 6125 (CPAF), UMR 6572 (LAMM), UMR 6573 (CCJ), UMR 7041 (ArScAn), UMR 7044 (Étude des civilisations de l'Antiquité), UMR 7192 (Proche-Orient, Caucase, Iran : diversités et continuités), UMR 8167 (Orient et Méditerranée), USR 3135 (IFPO).

– Archéologie, Histoire et Histoire de l'art de l'Asie centrale et du sous-continent indien : UMR 5189 (HiSoMA), UMR 7041 (ArScAn), UMR 7528 (Mondes iranien et indien), UMR 8546 (AOROC).

– Étude des manuscrits, philologie, épigraphie, diplomatique, littératures et philosophies : GDR2643 (*Ars scribendi*), GDR3177 (Diplomatique), GDR3279 (Théâtre antique), UMR 5189 (HiSoMA), UMR 5607 (IRAM), UMR 6125 (CPAF), UMR 6273 (CRAHAM), UMR 7041 (ArScAn), UMR 7044 (Étude des civilisations de l'Antiquité), UMR 7192 (Proche-Orient, Caucase, Iran), UMR 8164 (HALMA-IPEL), UMR 8167 (Orient et Méditerranée), UMR 8210 (AnHiMA), UMR 8584 (LEM), UPR 841 (IRHT), USR 710 (L'année épigraphique).

Les unités suivantes abritent des chercheurs qui effectuent des recherches dans des domaines très variés :

UMS 2739 (MSHDijon), USR 3224 (CRCC), USR 3225 (MAE).

## 2.3 LES CHERCHEURS EN MAI 2009

La section compte 249 actifs et 35 émérites ; c'est la plus grosse section de l'INSHS en nombre de chercheurs (13,2% des chercheurs des 9 sections relevant de l'INSHS). L'équilibre hommes – femmes y est relativement bien respecté : 51% – 49%. En revanche, la section 32 est l'une des sections qui compte le plus de personnel âgé.

Cet histogramme montre une situation tout à fait critique : 23,4% des chercheurs de la section 32 ont plus de 60 ans et seulement 5% des chercheurs ont moins de 35 ans ; cette situation est le reflet du trop petit nombre de postes mis au concours en section 32 ces dernières années (cf. infra).

Les 249 chercheurs actifs sont répartis de la manière suivante selon les grades :

DRCE : 1

DR 1 : 18

DR 2 : 76

CR 1 : 135

CR 2 : 19

Le tableau suivant donne l'évolution quantitative des différentes catégories de chercheurs évalués par la section 32 sur les 9 dernières années. Depuis 2002, on observe un net recul du nombre total de chercheurs en activité (-46, près de 15% des effectifs), soit une moyenne de 6 à 7 départs à la retraite qui ne sont pas remplacés chaque année.

**Tableau 1. Évolution quantitative des catégories de chercheurs CNRS statutaires évalués par la section 32**

	oct. 2000	déc. 2002	oct. 2005	déc. 2006	mai 2009
CR2	15	19	26	20	19
CR1	159	151	140	141	135
DR2	98	95	89	87	76

	oct. 2000	déc. 2002	oct. 2005	déc. 2006	mai 2009
DR1	15	17	19	17	18
DRCE	2	3	1	1	1
DREM	6	15	15	16	?
Total	295	310	290	282	?
dont actifs	289	295	275	266	249

Parmi les 249 chercheurs en activité en mai 2009, il faut encore déduire 3 chercheurs en disponibilité et 5 autres en détachement longue durée, qui selon toute probabilité ne réintégreront pas pour certains d'entre eux le CNRS puisqu'ils ont été recrutés sur un poste dans l'enseignement supérieur.

## 2.4 RECRUTEMENTS ET AFFECTATIONS DES CHERCHEURS

Sur 4 ans, la section 32 a bénéficié de 21 recrutements. À titre indicatif sur 5 ans, entre 2010 et 2014, 65 chercheurs de la section 32 partiront à la retraite, soit 2 chercheurs sur trois ne seront pas remplacés. En effet, la moyenne des départs à la retraite en section 32 est de 12,5 chercheurs par an (sur les années 2006-2009), soit de loin la moyenne la plus importante des SHS : il faudrait donc recruter 13 chercheurs par an pour uniquement combler les départs à la retraite. Or 4 CR et 1 DR ont été recrutés en 2009.

**Tableau 2. Affectation des chercheurs recrutés par la section 32**

2006	2007	2008	2009
SPECorte	UMR6173	UMR5189	UMR5133
UMR5607	UMR6573	UMR5594	UMR8167
UMR7044	UMR7041	UMR7041	UMR8584
UMR7044	UMR8589	UMR7192	UPR841
UMR8167	UPR841	UMR8167	UPR841
		UPR841	

## Répartition des CR recrutés de 2006 à 2009 par champ disciplinaire

- 1 Égyptologie
- 1 Papyrologie copte
- 1 Assyriologie
- 1 Archéologie mésopotamienne
- 2 Qumrân
- 1 Archéologie hellénistique du Proche-Orient
- 1 Sources grecques
- 1 Archéologie classique navale
- 2 Archéologie gallo-romaine
- Total 11 antiquistes
- 3 Archéologie médiévale
- 3 Textes médiévaux
- 1 Liturgie
- 2 Byzance
- 1 Diplomatique médiévale
- 1 Paléographie médiévale
- Total 11 médiévistes

Au total, 14 unités ont recruté un ou plusieurs chercheurs (dont l'UPR 841 et SPE Corte, 12 UMR sur un total de 23 unités) entre 2006 et 2009. Les unités qui ont recruté plus d'un chercheur sont les suivantes :

- UPR 841 4 chercheurs recrutés
- UMR 8167 3 chercheurs recrutés
- UMR 7044 2 chercheurs recrutés
- UMR 7041 2 chercheurs recrutés

Or il existe de très fortes disproportions dans les tailles des unités et le nombre de chercheurs et ITA ; les plus grosses unités de la section comptent plus de trente ou quarante chercheurs toute sections du CoNRS confondues, les plus petites moins de cinq. Ces chiffres doivent donc être rapportés au nombre de chercheurs statutaires par unité :

- UPR 841 30 chercheurs CNRS

UMR 8167	33 chercheurs CNRS et 111 EC
UMR 7044	5 chercheurs CNRS et 37 EC
UMR 7041	45 chercheurs CNRS et 178 EC

Les affectations ne reflètent pas les équipes formatrices, suivant la règle d'une affectation dans un autre laboratoire que celui où le chercheur a effectué sa thèse.

Les laboratoires de province bénéficient davantage des recrutements que les unités parisiennes, les jeunes chercheurs n'étant qu'à 30% affectés à ces dernières (contre 55% pour les plus de 60 ans) : soit la politique du CNRS a évolué vers plus de diversification dans les affectations, soit on finit sa carrière davantage à Paris, au CNRS. Le déséquilibre Paris-Provence reste néanmoins patent.

## 2.5 DÉLÉGATIONS, DÉTACHEMENTS ET BOURSES DOCTORALES ET POST-DOCTORALES : POUR DES RÈGLES CLAIRES

Depuis 2006, le CNRS a supprimé les campagnes officielles de détachements réservés à des enseignants du secondaire, des ITA ou des membres du ministère de la Culture et de l'INRAP. Néanmoins et en l'absence de campagne officielle, la section 32 a eu à statuer sur des dossiers de candidats à des détachements, y compris pour des enseignants-chercheurs. Par ailleurs, si le système des délégations des enseignant-chercheurs au CNRS afin de terminer une HDR ou mener à bien un projet est un dispositif qui doit être fortement soutenu, il est souhaitable que le choix des candidats (environ 40 à 45 en section 32) se fasse dans la transparence totale, selon des règles portées à la connaissance de la communauté scientifique. En ce qui concerne les bourses de thèse financées par le CNRS, une plus grande transparence pour leur répartition par laboratoire est souhaitable. Il est également souhaitable que le CNRS revienne sur la décision de ne plus attribuer de bourses post-doctorales. Le système des chaires d'excellence ne semble

pas emporter l'adhésion des universités. En l'absence de règle écrite, la section 32 a refusé de participer aux comités de sélection de chaires mises au concours.

## 2.6 LES ITA

### Des effectifs en diminution

Le nombre d'ITA CNRS dans les unités ayant pour rattachement principal la section 32 s'élève à 358 au 31 décembre 2009 (1). On observe entre 2005 et 2009 la perte de 36 postes, soit une baisse de 10% des effectifs, alors que la diminution des effectifs dans l'ensemble de notre EPST – on la déplore également –, pendant la même période, est de 2%. Ces données confirment, s'il en était besoin, que les sciences humaines et sociales du CNRS subissent plus que d'autres les restructurations en cours.

Tableau 3. Évolution des effectifs IT du CNRS par corps de 2005 à 2009

CORPS	AU 31/12 DE CHAQUE ANNÉE				
	2005	2006	2007	2008	2009
IR	106	101	98	95	95
IE	134	127	130	118	123
AI	43	39	44	49	48
T	95	89	88	82	78
AJT	16	18	14	14	14
<b>TOTAL</b>	<b>394</b>	<b>374</b>	<b>374</b>	<b>358</b>	<b>358</b>

Source Bilans sociaux – NB : Bilan social 2009, en cours de réalisation.

### Répartition par sexe

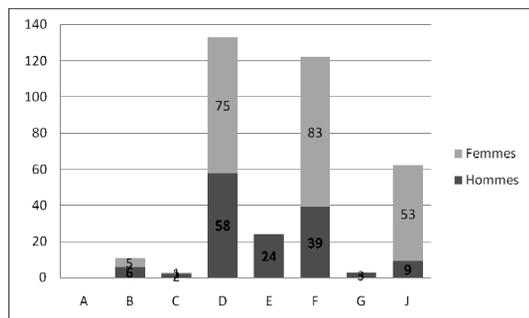
Les personnels de la section 32 comprennent une nette majorité de femmes (217 femmes – soit 61% – pour 141 hommes). Les répartitions H/F font apparaître des BAP plus féminisées que d'autres : la BAP J, avec

86 % de femmes) ; la BAP F (61 % de femmes) et la BAP D (56 % de femmes).

## Répartition par BAP

Les personnels CNRS de la section sont répartis principalement dans la BAP D (Sciences Humaines et Sociales) : 37 %, la BAP F (Documentation, Culture, Communication, Édition, TICE) : 34 %, puis la BAP J (Gestion et pilotage) : 17 %. Par ailleurs, on compte 24 agents en BAP E (Informatique, statistique et calcul scientifique) : 7 % ; 10 en BAP B (Sciences chimiques et sciences des matériaux) : 3 %, 3 agents en BAP C (Sciences de l'ingénierie et de l'instrumentation scientifique) et 3 en BAP G (Patrimoine, logistique, prévention et restauration).

**Tableau 4.** Répartition par BAP et par sexe



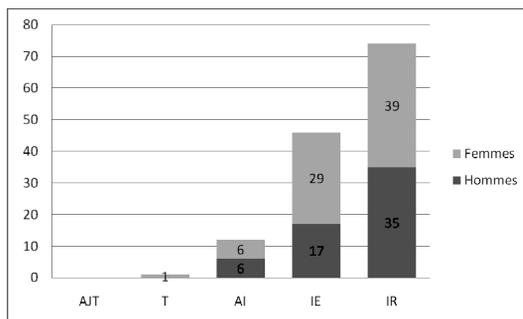
## Répartition par âge

L'âge moyen des IT de la section 32 est de 47,7 ans, contre 44.6 ans pour l'ensemble du CNRS. La médiane se situe à 48 ans : 16 % des agents ont plus de 60 ans et 13 % ont de 56 à 59 ans. Presqu'un IT sur trois pourra faire valoir ses droits à la retraite dans les 4 ans à venir.

Dans la BAP D, la moyenne d'âge passe à 48,7 ans : 20 % des agents ont plus de 60 ans et 14 % ont de 56 à 59 ans. La médiane est à 50 ans.

## Répartition par corps

**Tableau 7.** Répartition par corps et par sexe



Après celle d'adjoint technique, la catégorie T (technicien) a maintenant disparu dans 3 des 5 emplois-types de la BAP D (cf. Referens), notamment dans le domaine de l'archéologie. D'après les témoignages que nous avons pu recueillir dans certains laboratoires et à l'occasion de réunions de jurys de concours ou encore de comités de visite, la disparition de ces catégories entraîne une déqualification *de facto* de certains assistants-ingénieurs (AI) et ingénieurs d'études (IE), conduits à prendre en charge eux-mêmes les tâches préalablement dévolues aux adjoints techniques (AJT) ou aux techniciens. Les conséquences de cette disparition des corps d'AJT et de T se retrouvent de plus en plus fréquemment dans les profils de postes mis au concours dans la BAP pour les corps d'AI et d'IE. Avec un émiettement des tâches, se profile un(e) IE ou AI « à tout faire », une sorte « d'assistant multitâches », ce qui va à l'encontre des efforts fournis depuis une dizaine d'années pour clarifier et affermir les métiers au CNRS.

### 3 – PRODUCTION ET VISIBILITÉ DE LA RECHERCHE FRANÇAISE DANS LES DOMAINES REPRÉSENTÉS PAR LA SECTION

La section 32 se propose d'ouvrir une réflexion sur les colloques, les revues, les questions touchant à la bibliométrie et la valorisation.

## 4 – ÉTAT DES LIEUX

### 4.1 PÉRIMÈTRE DE LA SECTION

Au début de son mandat, la section 32 a délimité son périmètre, défini par des mots clés de la section :

- Archéologie, cultures matérielles, productions artistiques
- Histoire, langues, textes, images
- Antiquité et Moyen Âge
- Proche et Moyen Orient anciens, Monde gréco-romain, Occident latin du Moyen Âge, Monde byzantin et Orient chrétien, Mondes musulmans jusqu'au xv<sup>e</sup> siècle

Aujourd'hui, les mots-clés correspondant aux domaines représentés par les chercheurs de la section 32 sont les suivants :

#### *Champs thématiques / spécialités*

Anthropologie, Archéobotanique, Archéozoologie, Archéométrie, Archéologie, Architecture, Céramologie, Codicologie, Diplomatie, Édition de textes, Épigraphie, Géomatique appliquée, Histoire, Histoire de l'Art, Histoire des sciences, Histoire des religions, Historiographie, Iconographie, Musicologie, Numismatique, Paléo-environnement, Paléo-

anthropologie, Papyrologie, Prosopographie, Sigillographie, Sources manuscrites, Sources littéraires.

#### *Cultures / périodes*

Protohistoire tardive, Antiquité grecque, Antiquité romaine, Antiquité tardive, Égypte pharaonique, Islam médiéval, Méditerranée préclassique, Occident médiéval, Monde byzantin, Proche-Orient cunéiforme, Autre.

#### *Aires géographiques / culturelles*

Grèce, Rome, Égypte, Mésopotamie, Levant, Gaule, Afrique du Nord, Anatolie, Asie Centrale, Iran, Islam, Judaïsme, Christianisme, Autres religions, Inde, Soudan, Éthiopie, Afrique, Péninsule arabique, péninsule Ibérique, Balkans, Mer Noire, Italie, Germanie, Bretagne, Scandinavie, Monde Slave, Extrême Orient, Caucase, îles Britanniques, Sous-continent indien.

### 4.2 POINTS SUR CERTAINES AIRES CHRONO-CULTURELLES ET DOMAINES THÉMATIQUES

Le CNRS peut assurer la diversité des méthodes mises en œuvre par ses chercheurs sur des objets-sources multiples. Cette diversité est nécessaire parce qu'elle est la condition de la complémentarité. L'élaboration de sources documentaires se fait autant par de nouvelles découvertes exhumées par l'archéologie, que par les redécouvertes d'« objets » jusque là non remarqués (par exemple, les travaux sur les manuscrits épigraphiques, nombreux dans les collections françaises), mal publiés (qu'il s'agisse de textes ou d'objets iconographiques comme la publication annoncée des *ex voto* de Jupiter Héliopolitain qui sont au Louvre depuis un siècle), pas publiés (par exemple, des collections numismatiques et glyptiques du Cabinet des Médailles de Paris) ou encore à répertoire. Les bibliothèques et archives recèlent des *papyri* non édités, des manuscrits non exploités, à relire (avec de nouvelles identifi-

cations et affinement des chronologies de la transmission), à découvrir lorsqu'il y a des palimpsestes. En outre, les politiques culturelles nationales font que les documents trouvés par les archéologues restent désormais sur place ou sont renvoyés dans les pays d'origine (archives de Mari). Quels que soient les supports de ces sources, le statut de chercheur permet les séjours, longs et répétés, indispensables à leur découverte et examen. Alors que les enseignants-chercheurs ne disposent pas de temps suffisant pour séjourner longtemps sur le terrain.

### **Archéologie métropolitaine**

Le CNRS et les Universités jouent un rôle important dans la recherche archéologique métropolitaine, aux côtés des chercheurs de l'INRAP, de la Culture et des collectivités locales. Dans ce domaine, il est capital de maintenir une présence significative de chercheurs chargés d'animer des projets scientifiques qui ne relèvent pas des responsabilités des autres institutions. Il est également souhaitable que le CNRS manifeste son soutien à l'archéologie métropolitaine en appuyant des revues régionales, condition au soutien de ces revues par les collectivités locales.

### **La Méditerranée**

La Méditerranée constitue un des lieux privilégiés de la recherche française, comme le montrent un état des lieux de l'archéologie en Méditerranée demandé en 2009 par l'INSHS à Franck Braemer ou le projet Homère sur la Méditerranée piloté par la MMSH d'Aix-en-Provence et financé par l'ANR/ARP, puis par l'InSHS.

L'archéologie méditerranéenne qui prend appui sur des organismes de recherche française prestigieux (la Casa de Velázquez, l'EFR, l'EFA et l'IFAO) devrait être fortement soutenue pour assurer le renouvellement générationnel. Construits sur des partenariats avec les universités et organismes de recher-

che des pays concernés, ces programmes ont pu être menés grâce à une implication forte du CNRS dans le soutien aux programmes et aux chercheurs (CJB, l'IFEA, l'IFPO et CEALex du CNRS). Faute d'une politique volontariste fondée sur un élargissement des partenariats européens, les acquis de travaux pionniers où la recherche française occupe une place de premier plan au niveau international risqueraient d'entrer en crise faute d'un soutien approprié. Si l'histoire et – dans une moindre mesure – l'archéologie classiques (grecques et romaines) peuvent sembler encore assez bien représentées à l'Université, il n'en va pas de même pour certaines disciplines considérées comme « marginales » comme l'Étruscologie, l'étude du monde grec d'Occident et d'Extrême-Occident et de ses interactions avec le monde phénico-punique et les autres communautés de la péninsule Italienne et Ibérique. Alors que ces domaines bénéficient de découvertes archéologiques majeures réalisées dans les trente dernières années, on observe actuellement une perte de vitesse dans le développement des programmes. Cela tient en partie à un ralentissement de l'activité de terrain, mais aussi à la faiblesse des recrutements dans ce domaine, à l'Université comme au CNRS. Il conviendrait également de renforcer d'autres secteurs fondamentaux de la recherche archéologique au Maghreb ainsi qu'en Turquie.

La présence du CNRS est très importante au travers d'USR qui sont conventionnées avec de grands établissements (CJB avec l'EFR et CEALex avec l'IFAO); d'autres sont intégrées dans des UMIFRE avec le Ministère des Affaires Étrangères (IFPO, IFEA) affirmant la place de la France dans le champ considéré. Ce dispositif ouvert sur des partenariats et bien coordonné a besoin de recevoir des moyens financiers et humains suffisants et doit être en liaison avec les missions archéologiques, nombreuses notamment en Syrie. Un effort plus important doit permettre d'affirmer leur rôle notamment en matière de logistique et de documentation. La présence de ces UMIFRE au CNRS est un atout dans la coordination européenne de la recherche qui est appelée à se développer.

## L'Orient

L'Orient représente un champ de recherche immense d'un point de vue géographique, initialement défini au XIX<sup>e</sup> siècle. Il regroupe aujourd'hui les territoires depuis Istanbul jusqu'à la Chine, sa délimitation géographique étant actuellement relativisée par l'existence, sur cette portion du globe, de traditions de recherche et d'approches très différentes. Ce champ de recherche est en constante évolution géopolitique depuis une trentaine d'années.

L'étude de l'Orient ancien et médiéval couvre plus de cinq millénaires, selon qu'on se limite ou non aux sociétés de l'écrit, et mêle disciplines d'érudition, travail sur le terrain dans un secteur géographique difficile et réflexion théorique ; au cours de ces dernières décennies, les différentes approches ont été largement renouvelées, tandis que se poursuivait l'exploitation des sources documentaires nouvelles découvertes au cours du XX<sup>e</sup> siècle (tablettes inscrites de pictogrammes, cunéiformes et hiéroglyphes, Qumrân, Nag Hamadi...).

L'histoire et l'archéologie de l'Orient ancien et médiéval sont représentées par une population fortement vieillissante au CNRS et il existe peu de postes universitaires dans ces disciplines ; environ 70 à 80 % des intervenants dans ces domaines appartiennent au CNRS. À titre d'exemple, historiens et épigraphistes spécialistes des sources cunéiformes, disciplines pour lesquelles l'école française excelle depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, ont perdu plus du tiers de leurs effectifs au cours de ces dernières années, alors que le nombre de textes découverts ne cesse d'augmenter ; l'archéologie orientale, tout particulièrement du Levant, de la Mésopotamie et de l'Iran, voit partir à la retraite un autre tiers de ses spécialistes dans les cinq prochaines années. L'une des conséquences du vieillissement de cette population est le risque de fermeture de chantiers archéologiques français en Orient. En l'absence d'une politique active de recrutement d'archéologues spécialistes de l'aire culturelle orientale, capables de parler les langues des pays d'accueil, de connaître les milieux des pays d'accueil et leur

culture dans la très longue durée, et aptes à former localement de jeunes chercheurs (notamment en matière d'archéologie préventive ou de prise en compte du patrimoine) comme d'assurer une présence française dans la recherche internationale, des savoirs et savoir-faire risquent de disparaître. Une telle politique ne peut se mettre en place qu'avec un soutien fort des Instituts français dans ces pays (UMIFRE).

Dans les dix prochaines années, c'est également un tiers des spécialistes de l'islam médiéval et près de la moitié des chercheurs travaillant sur le monde byzantin et sur l'Égypte antique, tous domaines confondus, qui partiront à la retraite. Pour l'islam médiéval et le monde byzantin, l'archéologie traditionnelle, la numismatique et l'épigraphie sont les plus menacées. C'est particulièrement vrai de l'archéologie islamique, dans le cas de chantiers de fouille de première importance, au Moyen Orient et en Iran. Cette situation n'est pas simplement dommageable sur le plan scientifique, elle l'est aussi sur les plans politique et diplomatique. On peut regretter que le Maghreb soit pratiquement absent des investigations françaises en ce domaine. Outre le problème des départs à la retraite, des domaines comme la littérature rabbinique et les manuscrits de la Gueniza du Caire ou encore de la « Gueniza italienne » sont inexistantes au CNRS et pratiquement absents de l'Université, alors que de nombreux textes attendent d'être édités et que de jeunes chercheurs prometteurs sont formés à l'EPHE.

L'étude du christianisme antique est elle aussi réduite à la portion congrue, alors que le travail d'édition des œuvres patristiques grecques, latines et syriaques doit être poursuivi et que l'ampleur des corpus nécessite des recrutements au CNRS dans ces domaines. Un effort devra porter aussi sur le domaine de l'Orient chrétien. Celui-ci n'est plus considéré depuis longtemps comme relevant exclusivement de l'histoire des Églises et de la théologie mais comme faisant partie intégrante de l'histoire du Proche et plus lointain Orient (communautés d'Asie centrale, de Chine et d'Inde du sud par exemple, mais aussi d'Arménie,

d'Égypte, d'Éthiopie, d'Iran, de Syrie, du Liban, de Turquie et d'Iraq dont beaucoup sont toujours bien vivantes aujourd'hui). Cette histoire ne s'est certainement pas arrêtée avec les conquêtes arabo-musulmanes et joue toujours dans le paysage mondial un rôle majeur. On reconnaît aujourd'hui son intérêt pour la compréhension du monde arabo-musulman et tout spécialement de pays du Proche-Orient avec lesquels la France a des liens historiques (Liban, Syrie, par exemple). L'arrivée en France de populations chrétiennes venues du Liban, d'Iraq ou de Turquie a donné naissance dans notre pays à des communautés bien vivantes et toujours accrues par l'actualité. L'étude de leur langue, de leur culture et de leur histoire sur la longue durée, aujourd'hui menacées dans leur pays d'origine et par les phénomènes de diaspora, doit être soutenue et structurée.

Autre champ qui mériterait d'être pris en considération par le CNRS, l'histoire des derniers siècles du monde byzantin dans l'ensemble méditerranéen commence à être renouvelée de manière décisive.

En plus d'une politique active de recrutements adaptés aux différentes approches de recherche, l'implication des institutions dans des collaborations avec les pays concernés, via la formation par exemple, est indispensable.

## Les Sciences de l'érudition

La recherche en sciences de l'érudition constitue un pilier de l'excellence française. Or ces disciplines, autrefois appelées « sciences auxiliaires de l'histoire » – qui utilisent des compétences rares dans un ou plusieurs domaines spécifiques, qu'ils soient linguistiques ou qu'ils se rapportent à la matérialité de l'écrit, pour effectuer une analyse de première main sur les sources littéraires ou documentaires, et partant leur édition, leur étude et leur mise en perspective historique –, sont en réalité au fondement même de la démarche historique. Plus qu'un champ de recherche, les disciplines de l'érudition représentent une méthode de la

recherche historique, dans le domaine des études antiques et médiévales, qui s'inscrit dans le temps long, car elle nécessite l'acquisition de compétences, l'accumulation de données pour aboutir à la création de savoir. En France, ces disciplines ne sont plus guère représentées qu'au CNRS, où elles sont en voie de déperdition, et que dans de très rares établissements d'enseignement supérieur, comme l'EPHE ou l'ENS.

Deux disciplines au fondement même de l'étude des sources manuscrites, la paléographie, ou étude des écritures, et la codicologie, ou archéologie du livre, sont particulièrement menacées autant en France qu'à l'échelle de l'Europe, où elles ne sont plus guère représentées qu'en Italie. Les derniers recrutements en diplomatique et en paléographie, ainsi que la création d'un GDR « Diplomatique » redonnent du souffle à ces disciplines.

L'avenir de la papyrologie française est aujourd'hui menacé si aucune relève ne vient remplacer les départs à la retraite ; c'est vrai dans le domaine grec, ou encore dans le domaine copte, plus encore dans le domaine arabe, où la discipline n'est plus guère représentée en France. Pour éviter le cloisonnement entre papyrologie grecque, copte, arabe, alors même qu'elles s'occupent souvent des mêmes périodes historiques, l'interdisciplinarité linguistique serait évidemment à privilégier.

La recherche française s'est longtemps illustrée par l'édition et la traduction des sources. Alors que les domaines où des sources littéraires ou documentaires attendent leur première édition sont particulièrement nombreux, en particulier pour le Moyen Âge tant pour l'Occident médiéval latin ou roman que du côté de l'Orient (Byzance, christianismes orientaux, islam), les spécialistes en langues anciennes (latin et grec), et de manière beaucoup plus criante pour l'arabe, qui ont les compétences philologiques pour retourner aux sources manuscrites et éditer les textes, se font de plus en plus rares tant à l'Université qu'au CNRS. Pour les langues rares, domaine qui n'est traditionnellement pas représenté à l'Université, la situation est autrement préoccupante. Si l'étude du syriaque a été renforcée ces der-

nières années, en copte, en éthiopien, les chercheurs se comptent par unité ; pour l'arménien et le géorgien, il n'y a plus guère de spécialistes en France.

Avec le passage à l'ère du numérique, les méthodes de travail dans les disciplines de l'érudition ont évolué. Les dernières évolutions technologiques (comme le travail sur la reconnaissance numérique des écritures) permettent des avancées remarquables. Afin d'éviter le cloisonnement des recherches, le patient travail de constitution de fichiers a laissé la place à la constitution de bases de données intégrées et de corpus de sources, toutes indispensables au travail de l'historien. Ces réalisations toutefois ne sont envisageables sans le concours des ingénieurs, aujourd'hui plus encore que dans le passé.

## L'archéologie médiévale européenne

Née dans les années 1960 avec trois bonnes décennies de retard sur la Scandinavie, l'Allemagne ou la Pologne, et avec un développement beaucoup plus lent qu'en Angleterre, l'archéologie médiévale est, depuis 50 ans en France, qualifiée de discipline jeune. Ainsi s'expliquerait sa faible présence tant dans à l'Université qu'au CNRS : aux 3,5 chaires de professeur (2), et 24 postes de MCF, s'ajoutaient début 2009 21 chercheurs CNRS, qui ne sont aujourd'hui plus que 19, dont 7 auront 60 ans ou plus en 2012 (il est impossible faute de sources d'évaluer le nombre d'ITA concernés). Le mandat de cette section s'achèvera avec 12 à 14 chercheurs de moins de 60 ans. Ces effectifs montrent la faible capacité de la communauté scientifique à faire émerger véritablement ce domaine. La présence d'archéologues médiévistes à l'Inrap, dans les collectivités territoriales et aujourd'hui les entreprises, que l'on invoque souvent comme contrepartie n'en est pas une, dans la mesure où, comme le veut leur mission, ils se consacrent à l'archéologie de sauvetage et que le temps dévolu au traitement et à l'interprétation des données est toujours très insuffisant. L'urgence et le coût des travaux empêchent ici une

mise en perspective approfondie, d'autant plus nécessaire pourtant que les données produites dans le secteur préventif ont profondément renouvelé les corpus. Les détachements d'agents Inrap dans les UMR, prévus dans la convention Inrap-Cnrs et essentiels pour que les publications puissent être menées à terme, ne sont actuellement pas mis en œuvre.

Durant ces dernières décennies, pourtant, l'archéologie médiévale a su s'affirmer en transgressant les limites chronologiques du Moyen Âge et en élargissant ses thématiques. L'enjeu de son essor se comprend d'autant mieux si l'on considère qu'elle est de fait diachronique et qu'elle prend en charge aussi les périodes moderne et contemporaine : la section 33 ne recrute pas d'archéologue travaillant sur l'Europe, l'université non plus (un seul poste de MCF à Paris 1). Ici encore, on constate un retard sérieux par rapport aux pays anglo-saxons, où l'archéologie des périodes récentes est reconnue comme un champ capital pour l'épistémologie de l'ensemble de la discipline, ou à l'Italie : la revue anglaise *Post Medieval Archaeology* existe depuis 1966, *Archeologia post medievale* depuis 1997. Or dans tous les domaines, les grandes équipes d'archéologie médiévale française ont, ces vingt dernières années, ouvert la voie à un questionnement autonome – disciplinaire donc – en même temps qu'inscrit dans un dialogue étroit avec les autres sciences historiques, l'anthropologie, les sciences de la matière et de la nature. De grands chantiers s'en dégagent : approche multi-scalaire et modélisation spatio-temporelle de l'inscription des sociétés dans leur espace ; approche à micro et méso échelle des systèmes territoriaux ; compréhension des chaînes opératoires, des savoir faire et de leur transmission, des économies de production et des réseaux de circulation, tant dans le domaine de l'artisanat et de l'industrie, que dans celui de la construction ; approfondissement de la connaissance des modes de gestion des ressources, des systèmes d'exploitation agro-sylvo-pastoraux, des rapports à la nature, etc. Les avancées reposent sur des procédures interdisciplinaires élaborées qui savent confronter, sans plus les transposer, les données de l'archéologie, de l'histoire, de l'archéo-

métrie, du paléo-environnement. L'enjeu est donc aujourd'hui, pour l'essentiel, non plus de définir le champ de pertinence de l'archéologie médiévale, mais qu'elle se développe.

## L'Histoire des sciences et des techniques

Laissée pendant longtemps en marge des études anciennes et médiévales plus générales comme un domaine dit de « spécialistes », l'histoire des sciences et l'histoire des techniques sont parvenues ces dernières décennies à se faire reconnaître comme des domaines indispensables à l'intelligence du monde médiéval, et désormais du monde antique. Cependant, cette intégration est loin d'être entièrement réalisée. Un effort substantiel reste à fournir pour leur donner plus de visibilité et leur faire une place à part entière. Depuis quelques années, une exceptionnelle démarche interdisciplinaire a considérablement enrichi l'histoire des techniques, en particulier dans le domaine de la qualité des produits, grâce aux croisements opérés entre les sources écrites traditionnelles de l'historien et les analyses de la matière par les archéomètres, notamment les paléo-métallurgistes, les céramologues et les archéobiologistes. Il conviendrait de ne pas abandonner cette voie, sans néanmoins oublier que les sources écrites scientifiques (dont les publications se multiplient) et techniques sont un continent encore très imparfaitement sondé. Leur étude est pourtant riche d'enseignements sur le foisonnement intellectuel des « gens de savoir » du Moyen Âge par exemple, leur aptitude à élaborer des raisonnements scientifiques très complexes et leur contribution à l'élaboration de la science. Dans le domaine des techniques, tout un pan des savoirs reste à explorer, car les techniques ne sont pas uniquement celles de la production, mais aussi celles de la gestion et de l'économie et certaines relèvent autant de l'histoire des techniques que des sciences : usages des nombres, de la mesure, de la comptabilité, par exemple. Des recherches se développent en montrant les éclairages renouvelés que fournissent les domaines scientifiques et techniques sur la

société et les cultures anciennes et médiévales, excédant de loin le seul domaine des universitaires. La place de l'expert traverse également tous les champs de l'histoire ancienne et médiévale.

## L'Antiquité classique

L'Antiquité classique est d'abord un champ patrimonial dans lequel la science française s'est illustrée, entre autres pour des raisons historiques (l'Empire « colonial »). Elle détient donc, concrètement et virtuellement, des richesses documentaires à exploiter. Ses Écoles françaises à l'étranger (autour de la Méditerranée) constituent un réseau scientifique qui n'a que trois équivalents (Allemagne, Angleterre et États-Unis) et dont le CNRS doit être à la fois acteur et partenaire sans abandonner ce champ de recherche à la seule université. L'Antiquité classique est aussi un « lieu » culturel pour les SHS qui est une tradition française depuis la Renaissance, et que les grands pays savants (européens et américain) n'abandonnent pas, malgré les menaces (cf. les financements importants de la DFG allemande pour des projets de courte et longue durée, jusqu'à 12 ans, en Antiquité classique).

Le CNRS peut donc être un lieu de réflexion sur les enjeux contemporains à partir de l'étude de situations passées. Cette dimension est plus spécialement manifeste dans deux questionnements. a) Les études sur les phénomènes de réception, dans l'Antiquité déjà et de l'Antiquité dans les périodes ultérieures, et plus largement sur les processus de construction et transmission des savoirs (cf. l'importance de la tradition classique pour la constitution des réalités et représentations occidentales du politique, du droit, de l'esthétique, etc.).

b) La compréhension du monde méditerranéen qui est au cœur de préoccupations politiques et socio-économiques actuelles (Nord-Sud), ainsi que d'ordre ethnique et religieux. À cet égard, les Empires d'Alexandre et de Rome qui furent les premiers mondes « globalisés » sur plus d'un millénaire offrent de tester sereine-

ment des modèles de cohabitations, de transferts et d'interrelations (multilinguisme, identités ethniques, culturelles et religieuses), de représentations mentales différenciées et de processus de prise de décision dans des situations relationnelles possiblement conflictuelles. À cet égard, les travaux d'histoire comparée des religions (puisque le monde romain vit cohabiter des systèmes religieux différents, puis se mettre en place des pouvoirs légitimés par le religieux, le christianisme puis l'Islam à la fin de l'Antiquité tardive) sont un laboratoire précieux pour étudier les mécanismes politiques et sociaux dans des « régimes de vérité » différents.

### **Les implications du passage de la section 31 de l'INSHS à l'INEE**

À l'automne 2009, la section 31 « Hommes et milieux » qui recouvre entre autres « Cultures, techniques et économies des sociétés préhistoriques et protohistoriques », a décidé de son rattachement à l'INEE, départ entériné en janvier 2010. Ce départ a eu pour effet une scission de l'archéologie entre archéologie pré- et protohistorique et archéologie historique, six unités en rattachement principal à cette section ayant décidé de demeurer à l'INSHS.

L'archéologie va aujourd'hui de l'archéométrie aux sciences de la nature et à l'anthropologie ; elle dispose d'une expertise unique dans un domaine essentiel pour l'avenir : l'appréhension des processus sociaux et socio-environnementaux à des échelles de temps très diverses, décennale, séculaire, millénaire, plurimillénaire. Cette manipulation d'échelles temporelles, très familière à l'archéologue s'assortit d'une expérience de la diversité des échelles spatiales (toute donnée archéologique est par nature spatialisée). La pratique du terrain confronte donc constamment l'archéologue à la succession de traces – continues / discontinues – à des échelles spatio-temporelles très diverses, dont l'affinement de la « chronométrie » a élargi encore la palette.

Couper l'archéologie historique de l'archéologie préhistorique, c'est couper net cet

élan. C'est faire croire aussi à une archéologie robuste d'un côté, appuyée sur les sciences dures, opposée à une archéologie classique de l'autre, appuyée sur la seule interdisciplinarité inter-SHS. Il n'en est rien :

- l'archéologie antique et médiévale a intégré depuis longtemps les disciplines naturalistes et l'archéométrie ;

- elle est pionnière dans les questions de modélisation des dynamiques spatio-temporelles (des réseaux de peuplement, des courants de circulation, des modes d'exploitation du milieu) ;

- du fait de l'existence des sources écrites, et de son voisinage parfois étroit avec les données ethnographiques, elle apporte par ailleurs à l'archéologie tout entière une expérience particulièrement poussée dans trois domaines :

- elle possède l'éventail le plus large de sources et donc une forte expertise en matière d'interdisciplinarité et de traitement de données hétérogènes ;

- elle est habituée, à travers les données historiques, à manier les échelles temporelles les plus fines ;

- enfin, elle est habituée aussi à confronter les traces matérielles à des réseaux sociaux et à des dynamiques sociales, documentés avec une grande finesse. Elle a donc une forte expérience de la comparaison des sources, qui est un moteur essentiel pour dépasser les lectures disciplinaires, éviter les apories de l'interdisciplinarité et recourir à des modèles plus complexes.

Dans la pratique, le terrain archéologique est donc, aujourd'hui, le lieu par excellence du croisement des sources les plus diverses et d'interrogations sur les relations sociétés-espace-environnement aux échelles les plus variées (du temps et de l'espace de la pratique quotidienne à ceux de l'histoire sociale et de l'histoire sédimentaire). D'un point de vue méthodologique et théorique, cette expérience nourrit actuellement une réflexion novatrice, pour l'ensemble des SHS, sur la construction et l'association de corpus de données hétérogènes, et sur la prise en compte, dans ces opé-

rations, des différents degrés d'incertitude des données et des hypothèses.

Une scission de l'archéologie selon un clivage chronologique depuis longtemps dépassé risque de mettre à mal ces perspectives, parmi les plus prometteuses. Ranger les sociétés préhistoriques du côté de l'environnement et les sociétés historiques du côté du social, sans réfléchir à ces questions, consiste à revenir implicitement

- sur les acquis concernant la complexité des sociétés préhistoriques

- sur les interrogations concernant la complexité des relations entre les sociétés historiques et leur environnement.

La configuration des sections du Comité national se trouve profondément remise en question par la création d'instituts disciplinaires, puis par l'intégration de la section 31 à l'INEE. Un travail de réflexion sur les fondements mêmes de nos disciplines de recherche est ainsi devenu indispensable et il est urgent. L'exercice s'avère plus difficile en SHS où des contradictions épistémologiques fondamentales divisent le milieu. Il est urgent d'une façon générale, mais sans doute plus encore pour les sciences des mondes anciens.

Il y a certes l'intérêt d'une continuité au sein de l'INSHS de l'archéologie préhistorique et l'archéologie historique, mais la section 32 – la plus grosse section des SHS et couvrant un large domaine : chronologie histoire antique (écriture 3400 av. J.-C.) et médiévale (v. 1500) soit cinq millénaires et géographie planétaire – ne peut pas absorber la pré- et protohistoire.

Un redécoupage des sections serait nécessaire et ne peut se faire qu'en concertation avec toutes les sections concernées des SHS et le Comité de l'archéologie. En outre, d'autres champs disciplinaires ont du mal à trouver leur place dans les sections telles qu'elles sont définies actuellement : Amérique précolombienne ou Extrême Orient.

## **5 – ÉTAT DES LIEUX ET PROSPECTIVE**

### **5.1 REPRÉSENTATION DES DOMAINES EN NOMBRE DE CHERCHEURS**

Plusieurs domaines seront particulièrement affectés par le départ à la retraite de chercheurs dans les cinq prochaines années.

- Protohistoire : la section compte 17 chercheurs travaillant souvent en diachronie aussi sur des périodes historiques ; tous archéologues ou archéomètres ; sans doute davantage si l'on compte les archéomètres. 3 d'entre eux ont plus de 60 ans et 3 autres plus de 55 ans.

- Archéologie métropolitaine : 33 chercheurs effectuent des fouilles sur le territoire français ; 9 d'entre eux ont plus de 60 ans et 13 plus de 55 ans.

- Italie pré-classique : 4 chercheurs travaillent en étruscologie, dont 3 ont plus de 60 ans : tous appartiennent à l'unité AOROC.

- Proche-Orient cunéiforme : 18 chercheurs fouillent au Proche-Orient ou travaillent sur les textes cunéiformes ; 5 d'entre eux ont plus de 60 ans et 8 plus de 55 ans. Dans 5 ans, plus des deux-tiers de ces chercheurs pourront partir à la retraite.

- Égypte : 17 chercheurs dont 11 en égyptologie, 4 sur l'Antiquité et 2 sur la période copte. 4 égyptologues ont plus de 60 ans et 6 plus de 55 ans.

- Judaïsme antique et médiéval : 5 chercheurs de la section travaillent sur le judaïsme, l'un d'entre eux part à la retraite en 2010 et un autre vient d'être recruté comme Directeur d'études à l'EPHE.

- Monde byzantin : 12 chercheurs dont 2 ont plus de 60 ans et 6 plus de 55 ans.

- Islam médiéval : 9 chercheurs dont 4 seront à la retraite dans 10 ans.

- Éthiopie : 2 chercheurs dont l'un a plus de 55 ans.
- Extrême Orient : un seul chercheur de la section.
- Antiquité gréco-romaine : 60 chercheurs dont la moitié part à la retraite dans les 5 ans.
- Occident médiéval : 53 chercheurs dont 15 partent à la retraite dans les 5 ans.

## 5.2 PROSPECTIVE

Eu égard aux développements scientifiques de la période écoulée et au paysage international, le prochain quadriennal devrait, en matière de thématiques, à la fois : 1) poursuivre dans des domaines de recherche « patrimoniaux » sans cesse renouvelés – comme l'étude des textes ou l'archéologie classique récemment illustrée par des découvertes retentissantes – et 2) promouvoir parallèlement des directions de recherche dans lesquelles les « Mondes antiques et médiévaux » construisent des matériaux de réflexion pour des décisions qui engagent les sociétés multiculturelles dans un monde globalisé. Les directions les plus sensibles et fécondes aujourd'hui sont : les enquêtes sur les réseaux (*networks*) dans tous les domaines de l'histoire du monde euro-méditerranéen (politique, économique, social, religieux), celles sur les phénomènes de réception, dans l'Antiquité déjà et de l'Antiquité dans les périodes ultérieures, celles sur l'apport des sciences cognitives à l'intelligence de la construction des représentations mentales et des processus de prise de décision (politiques, sociaux et religieux), celles sur le genre (*gender studies*), celles sur l'anthropologie de la nature, etc. Ces champs constituent des enjeux sensibles dans les sociétés civiles et politiques contemporaines. Leur investigation suppose de favoriser le dialogue entre spécialistes d'objets-sources différents, plutôt que d'isoler un certain type de documents ; elle suppose aussi de favoriser les contacts interdisciplinaires au sein des SHS (avec les périodes plus anciennes et plus récentes ou avec l'an-

thropologie par ex.) et au-delà (avec l'INEE et les SDV par ex.). On pourrait même imaginer la création d'une unité propre thématique, centrée sur un ou plusieurs grand(s) défi(s) des sciences humaines, et construite sur le dialogue des objets-sources et des méthodes. La mise en œuvre de ces initiatives, concrètement diverses (depuis l'élaboration la plus moderne d'ensembles documentaires thématiques jusqu'à des réflexions plus théoriques sur certains dossiers, depuis des projets humainement circonscrits jusqu'à des projets de très grande ampleur), pourrait mettre la section 32 en interface entre chercheurs, Très Grands Équipements, partenaires des SHS et autres partenaires du CNRS.

\*  
\* \*

L'INSHS est le mieux à même de piloter la collecte et la mise à disposition de la communauté scientifique de documents vérifiés dans le domaine couvert par la section 32, grâce d'abord à Adonis qui doit trouver un relais dans le périmètre de cette section. Ce dispositif permettrait de diffuser et soutenir des projets liés à l'activité de recherche de doctorants et de chercheurs.

La structure collaborative de la constitution d'un corpus devrait aussi trouver une place naturelle dans ce cadre. Ces corpus peuvent porter sur des textes (par ex. épigraphie, textes littéraires), sur des monuments figurés (par ex. architecture, sculpture) ou des images (iconographie). Pour faciliter un accès facile à tout type de documentation, le soutien à des entreprises de numérisation et de diffusion sur internet de documents en liaison avec des notices au contenu vérifié permet d'ouvrir le champ des collaborations institutionnelles à d'autres communautés que celles de la section 32 et à des partenaires étrangers. La question des métadonnées et de l'interopérabilité sera particulièrement importante, car il existe plusieurs systèmes, sans standardisation, et l'appui de l'INSHS devrait permettre l'émergence d'outils partagés.

Dans la perspective de la mise en œuvre de l'interdisciplinarité fortement recommandée

par le CNRS, la section 32 pourrait intégrer une CID alors qu'elle n'est aujourd'hui présente dans aucune des CID existantes contrairement à toutes les autres sections des SHS, comme si elle avait géré toute seule et en interne ses développements interdisciplinaires.

Ne pourrait-il pas y avoir une CID créée à l'INSHS, qui porte sur les dynamiques des systèmes sociaux, modélisations spatio-temporelles et réseaux, artefacts et pratiques. Elle pourrait être ouverte à la 32, bien évidemment et en priorité, aux sections 31, 33, 38 des SHS, mais aussi aux mathématiciens, informaticiens, à la biologie, à la physique... : la grande sphère d'interdisciplinarité autour des sciences archéologiques et historiques dans une perspective d'étude

des dynamiques temporelles des sociétés, et des interactions sociétés – espaces – réseaux.

Il s'agit d'explicitier avec force ce qui est un atout et la résultante d'un effort soutenu d'ouverture : l'interdisciplinarité profonde de l'archéologie et des sciences historiques, dans le champ du temps des sociétés. Il s'agit également de faire œuvre de vraie prospective : prendre des paris, miser davantage encore sur l'interdisciplinarité, et sur la capacité des sciences archéologiques et historiques à créer de nouveaux champs d'investigation : comparabilité, temps long, complexité des réseaux sociaux et spatiaux, et des interactions société-environnement y compris à micro-échelle, celle de la micro-histoire.

---

## Notes

(1) Source : bilan social, observatoire des métiers du CNRS.

(2) Paris, Rouen, poste mixte histoire de l'art et archéologie à Toulouse, chaire EHESS Lyon.

# MONDES MODERNES ET CONTEMPORAINS

*Président*

Jean-Marie GUILLON

*Membres de la section*

Annie ANTOINE

Marc-Olivier BARUCH

Françoise BLUM

Olivier BONFAIT

Michel CAHEN

Frédéric CHAUVÉAU

Karine CHEMLA

Denis CROUZET

Olivier DARD (2008-2009)

Randi DEGUILHEM

Marie-Elizabeth DUCREUX-LAKITS

Laurence FONTAINE

Laurence GALLITRE

Pierre GERVAIS

Christian INGRAO

Annick LEMPÉRIÈRE

Isabelle LUCIANI

Dominique POULOT

Catherine RHEIN

Cécile SOUDAN

Isik TAMDOGAN

## 1 – CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les recherches des unités de la section se concentrent sur l'évolution historique des sociétés humaines principalement durant les cinq derniers siècles. C'est pourquoi son intitulé est devenu **Mondes modernes et contemporains** lors de l'avant-dernière mandature. La tranche chronologique privilégiée, l'extension mondiale du périmètre des études, la prise en compte du temps actuel, l'ouverture aux méthodes et questionnements des disciplines proches, l'éventail des orientations présentes au sein de la section font que celle-ci dépasse notablement l'histoire au sens strict. Par ailleurs, les unités dont le CNRS partage ou assure la tutelle ne représentent qu'une partie, relativement réduite, de l'ensemble des équipes de recherches travaillant dans les champs qui sont les siens, même si celles-ci ont l'ambition de jouer un rôle déterminant dans leurs domaines respectifs.

Réaliser un rapport de conjoncture solidement fondé, surtout pour un ensemble dépassant largement le seul cadre du CNRS, demanderait des moyens (en temps et en personnel) dont les sections ne disposent pas. Ce travail supposerait pour le moins que des données fiables, à commencer par celles qui concernent les unités liées au CNRS, soit fournies systématiquement par les administrations de tutelle. Elle supposerait qu'une session au

moins du Comité national soit consacrée à ce travail. Ces conditions, il est vrai, n'ont jamais été assurées par le passé. Dans la conjoncture d'aujourd'hui, elles se seraient imposées. La redéfinition des tâches induites par la création des instituts, l'évolution des relations entre le CNRS et les universités et autres établissements du supérieur, l'émergence du réseau des MSH, la création du Conseil pour le développement des Humanités et des Sciences sociales, la mise en place de l'ANR et de l'AERES nécessitent une réflexion approfondie et la plus large possible sur les orientations de nos disciplines. Faire un rapport de conjoncture digne de ce nom impliquerait donc d'avoir une vision globale des unités de recherches (en France et à l'étranger), des réseaux structurés auxquels elles se rattachent (MSH, GDR, GIS, RTP, etc.), des personnels de divers statuts dont elles disposent (et de leur démographie), des moyens financiers mobilisés par les différentes instances concernées, des programmes en cours et des projets proposés, des appels d'offre multiples qui sont désormais lancés, à divers niveaux, des contrats obtenus, notamment avec l'ANR ou dans le cadre européen, des très nombreuses revues, publications de centres de recherches et autres supports de qualité qui offrent la possibilité de publier, des sites internet qui se développent et constituent un autre espace de communication de la recherche, sans oublier d'avoir également une vision d'ensemble d'autres acteurs ou éléments du champ : centres de documentation et d'archives, musées et autres lieux d'expositions, associations érudites ou spécialisées qui sont aussi des lieux d'intervention pour les chercheurs des domaines de la section 33. Cette observation impliquerait de plus une analyse critique du fonctionnement et des évaluations de l'AERES. Elle nécessiterait un regard critique sur la politique conduite depuis une dizaine d'années par le CNRS, comme par les universités et les établissements, au moins dans nos domaines.

Ajoutons que la capacité d'expertise de la section 33 a été singulièrement affaiblie par le nouveau système d'évaluation des unités et par la façon dont l'INSHS s'y est adapté. En effet, le regard de la section sur les laboratoires ne peut plus reposer sur la connaissance précise que

permettait l'évaluation auparavant. Celle-ci se faisait collectivement, après une visite des unités concernées, sur la base des propositions de deux rapporteurs et des observations du comité de visite (dont faisait partie un élu ITA). Il est donc dans les conditions d'aujourd'hui parfaitement illusoire de demander aux sections une appréciation satisfaisante des domaines de leur ressort, alors qu'elles n'ont même plus les moyens de l'avoir sur le périmètre qui est le leur !

Par conséquent, la section regrette que le rapport de conjoncture de cette mandature n'ait pas été, au moins, repoussé à une échéance ultérieure afin de permettre au Comité national et aux instituts – à commencer par l'INSHS – une réflexion plus approfondie sur leurs missions et leur place dans la recherche publique française et, plus largement, dans la recherche internationale.

Dans ces conditions, le rapport n'examinera pas les orientations générales des recherches en cours, pas plus qu'il ne tentera de discerner d'éventuels domaines émergents, d'autant que le précédent rapport de conjoncture avait donné sur ces points des indications générales qui n'ont rien perdu de leur pertinence. Le rapport tentera de faire un état des lieux de la section à partir des données imparfaites qui sont à sa disposition.

## 2 – LA SECTION 33

### 2.1 PÉRIMÈTRE DE LA SECTION

Les mots clés de la section ont été choisis lors du changement de son intitulé et maintenus par la précédente mandature, de même qu'ils l'ont été par celle-ci pour les raisons de conjoncture liées aux évolutions signalées précédemment. Mais ils reflètent tant son caractère composite que les problèmes que posent le large spectre qui est le sien et des délimitations qui se justifiaient au moment de la création de

la section, mais sur lesquelles on peut s'interroger aujourd'hui : « Histoire des époques moderne et contemporaine dans toutes ses composantes et ses approches (politique, économique, sociale, culturelle). Histoire de l'art (époques moderne et contemporaine). Mondes non-européens selon la périodisation de chacun : histoire ; sources écrites et cultures matérielles traitées dans leur dimension historique (sauf l'islam médiéval méditerranéen) ».

Ce chapeau regroupe deux ensembles bien identifiables :

– L'histoire des époques moderne et contemporaine qui concerne principalement l'Europe (en particulier la France) et de manière plus accessoire les mondes façonnés par l'expansion européenne, ce qui pose particulièrement la question de la place – sans doute trop réduite – des Amériques. Au sein de cet ensemble, la répartition des formations dans l'enseignement supérieur conduit à distinguer histoire moderne, histoire contemporaine et histoire de l'art moderne et contemporain. Ces distinctions, qui ont heureusement tendance à évoluer, jouent dans une moindre mesure pour les unités de recherche qui, le plus souvent – et notamment pour celles qui sont liées à la section – associent modernistes et contemporanéistes, et, plus rarement, historiens de l'art.

– Les « civilisations non-européennes », sachant que les populations indiennes d'Amérique sont pratiquement absentes (et même totalement pour la période précolombienne) et que l'Océanie n'est représentée, si l'on peut dire, que par un seul chercheur. Les champs de la section concernent donc presque exclusivement les cultures d'Afrique et d'Asie. Le cadre chronologique des travaux sur l'Asie et le Moyen-Orient est évidemment plus large que pour l'Europe, ce que reflètent les orientations et les méthodes de recherches des unités concernées par ces aires (études des systèmes de pensée, des textes, des arts de périodes antérieures au XVI<sup>e</sup> siècle). Cet élargissement vers l'amont pose de plus en plus problème, car il brouille les limites du périmètre de la section et rend complexe son ajustement avec la section 32. Les difficultés apparaissent

sur deux plans : d'une part, sur la place des époques anciennes et « médiévales » du Moyen-Orient, sachant que, pour le monde méditerranéen et le Proche-Orient (et notamment l'islam), elles relèvent de la section 32 ; d'autre part, sur la place de l'archéologie « classique » pour l'évaluation de laquelle la section n'est pas compétente. L'absence actuelle parmi ses membres de spécialistes de ces deux domaines illustre leur caractère de plus en plus marginal et soulève la question du maintien dans son giron de cet héritage de l'« orientalisme ». Il s'agit d'un réel problème, qui peut avoir des conséquences sur les recrutements puisque se présentent aux concours sur les postes de la section 33 quelques candidats – archéologues « purs », spécialistes de textes anciens – qui peuvent difficilement être pris en compte.

Des difficultés similaires apparaissent aussi pour d'autres candidats au recrutement qui portent des problématiques – de nature littéraire, linguistique, philosophique, anthropologique, sociologique, politiste – qui ne sont pas en adéquation avec les questionnements historiens qui caractérisent la section. Un problème connexe est lié au « civilisationnisme » caractéristique des unités de recherches universitaires dans le domaine des études romanes et anglo-américaines et du trop fréquent décalage des travaux historiques qu'elles patronnent avec les exigences scientifiques de la discipline historique.

## 2.2 CARACTÉRISTIQUES DE LA SECTION

Comme il a été dit, la recherche universitaire est très présente dans les champs de la section 33, à travers notamment ses équipes d'accueil. Cette place est particulièrement importante dans le domaine de l'histoire de l'Europe, alors qu'elle est bien moindre pour les mondes non-européens. Ce déséquilibre se ressent aussi parmi les UMR de la section, encore que l'écart entre l'investissement CNRS

et celui des universités concernées soit moindre que ce que l'on peut imaginer *a priori*. La part respective de l'Université, des Établissements spécialisés (École Pratique des Hautes Études, École des Hautes Études en Sciences sociales, ENS, INALCO, Collège de France) et du CNRS n'en est pas moins l'un des éléments qui contribuent à la distinction entre les deux ensembles qui composent la section et cela joue sur la composition des laboratoires.

– Pour l'ensemble des unités travaillant sur la France et l'Europe, le principe d'organisation des équipes donne la prééminence à une discipline, l'histoire en l'occurrence, et même parfois à une spécialité dans cette discipline. Au sein de ce groupe, l'histoire de l'art se singularise et cette spécificité a tendance à se renforcer. Deux unités « européennes » de la section seulement associent pleinement historiens et historiens de l'art (l'IRHIS et le LARHRA). La majorité des unités de cet ensemble est donc mono-disciplinaire. Les méthodes, les normes, les questionnements sont ceux de la recherche en histoire. Elles touchent à tous ses champs, dans leur diversité. Les enseignants-chercheurs constituent la très grande majorité des membres des unités de cet ensemble. Il faut souligner le rôle qu'a joué la structuration en UMR – l'association avec le CNRS – dans cette communauté en instaurant une « culture de recherche » et de laboratoire et en favorisant l'internationalisation et le décloisonnement des travaux. Cette organisation, avec ces orientations, a souvent servi de modèle pour les équipes d'accueil. Elle joue un rôle d'entraînement dans le milieu. En 2009, 14 unités de la section sur 24 relèvent de cet ensemble plutôt européeniste, souvent généraliste, très tourné vers l'histoire de France, mais avec parfois une dominante thématique (histoire économique, histoire des sciences, histoire sociale, histoire de l'art, histoire du temps présent, relations internationales).

– Les unités dites d'« aire culturelle » sont plutôt spécialisées sur les mondes non-européens. Cette notion d'« aire culturelle » est comprise de deux façons, qui coexistent dans le périmètre des équipes relevant de la section. L'une, plus anthropologique, n'englobe que les cultures non-européennes. L'autre, plus civili-

sationniste au départ, concerne aussi les mondes russes, germaniques, ottomans et balkaniques. Ces équipes sont le plus souvent pluridisciplinaires et cette tendance a été favorisée par les regroupements d'UMR qui ont eu lieu ces dernières années. Ce constat vaut particulièrement pour les unités travaillant sur l'Asie. Compte tenu des origines du rattachement à la section 33 de ces unités, les chercheurs non historiens des équipes « aires culturelles » ont alors fréquemment choisi de se rattacher à elle, notamment pour les disciplines telles que l'archéologie, la philologie, la linguistique, la littérature ou l'anthropologie. Par contraste, il apparaît que les unités axées sur des régions européennes ou en partie européennes ont fait ces dernières années une place plus forte à l'histoire. Mais la réflexion actuelle sur l'histoire des circulations et des transferts et sur la mondialisation conduit à donner à leurs travaux une dimension extra-européenne et à renouveler leur approche en décentrant le regard par rapport à une histoire européenne traditionnellement axée sur la France et la Méditerranée occidentale. Les universités étant peu présentes sur ces terrains, le CNRS a joué et joue ici encore un rôle essentiel. Le rapport 2006 notait déjà, à juste titre, que, bien souvent, l'avenir de ces unités – ou plus exactement l'avenir de certaines de leurs spécialisations les plus érudites – en dépendait largement. Dans ces unités, le rapport chercheurs/enseignants-chercheurs est donc assez différent de celui de l'autre ensemble. L'évolution de la démographie des chercheurs est inquiétante partout, mais tout particulièrement dans ces domaines, car il s'agit parfois de survie de spécialités. On peut regretter cependant que, souvent, les chercheurs de ces domaines n'ont pas mis la transmission de leurs compétences parmi les priorités de leur travail, mais il est vrai que, bien souvent, les établissements de l'enseignement supérieur ne leur en ont pas donné la possibilité. L'une des missions de ces unités est en effet de former de jeunes chercheurs dans des langues et des écritures peu enseignées (et parfois rares), de rassembler des ressources bibliographiques ou une documentation unique sur le territoire national et de faciliter l'accès à des terrains souvent

difficiles. Leurs travaux doivent répondre nécessairement à des objectifs de rayonnement international et de reconnaissance scientifique dans les pays où leurs recherches s'inscrivent. La consolidation des centres français à l'étranger, sur lesquels on reviendra, est ici fondamentale. L'une des faiblesses relatives des recherches en ces domaines réside peut-être dans les politiques de publications périodiques, qui n'ont pas forcément la diffusion et la reconnaissance à l'extérieur qui seraient souhaitables. Mais cette situation est à examiner au cas par cas. Satisfaisante ici (le monde arabo-turc), elle peut appeler à des regroupements de publications, à des réorientations ou à un effort de création là (l'Asie du Sud-Est, l'Afrique, etc.). Cet ensemble comprend 10 unités : 4 sur l'Asie, 1 sur l'Afrique subsaharienne, 1 sur les mondes américains, 1 sur le monde arabo-musulman, 1 sur le domaine turc et 1 sur le domaine russe, mais d'assez nombreux chercheurs de la section spécialisés sur ces aires sont également présents, et parfois très présents (domaines iranien et indien), dans des unités qui n'en dépendent pas.

Il est à noter que certaines unités qui se situent aux marges du monde européen présentent des caractères de mixité entre les deux ensembles constitutifs de la section : pluridisciplinarité mais avec une forte prégnance historique, aire géographique particulière et majorité d'enseignants-chercheurs, insertion dans les milieux scientifiques des pays concernés et appui sur des institutions de recherche françaises à l'étranger. Il s'agit des unités dont les travaux sont orientés vers les Amériques (MASCIPPO), le monde russe (CERCEC), la Méditerranée (TELEMME), ainsi que le CRIA sur l'Allemagne.

Pour terminer sur cette présentation cavalière des champs de la section (car, de fait, dans le plupart des domaines, la volonté de comparaison trouble les schémas anciens de partition du savoir), reprenons ce que le rapport de conjoncture précédent soulignait : la section 33, dans cette configuration, a permis aux deux ensembles de se mieux connaître, elle a contribué à renouveler les approches de part et d'autre, elle a favorisé l'ouverture de l'histoire

européenne sur les mondes extérieurs, elle a aidé à intégrer des problématiques de l'histoire « européenne » dans les recherches sur ces mondes. Comme en témoignent désormais les projets de recherche, elle a contribué à faire évoluer les unités. Elle a ainsi accompagné leur internationalisation et, plus largement, celle de l'histoire en France.

## 3 – LES UNITÉS

### 3.1 UMR ET UPR

En 2007, la section comptait 27 unités en rattachement principal, soit 25 UMR, 1 UPR, 1 FRE. La réduction du nombre d'UMR était déjà notable puisque leur nombre était de 37 avant 2005. Quant aux FRE, elles allaient passer entre 2007 et aujourd'hui de 2 à 3, avant de disparaître sans que l'avis de la section sur leur avenir éventuel au sein du CNRS ait été sollicité.

Actuellement, en 2010, la section compte en rattachement principal 1 UPR et 23 UMR. Le mouvement de concentration a donc été sensible. Ces regroupements ont concerné avant tout les unités d'« aires culturelles » de la région parisienne. Le pari n'était pas gagné lorsque la fusion a été imposée et il faut saluer l'engagement des membres de ces unités qui sont parvenus à transformer des fusions plus ou moins bien subies en succès. La plupart des équipes sont de très grande qualité, leur rayonnement international bien établi et leur lisibilité est satisfaisante. Les regroupements d'unités de la section ne s'imposent pratiquement plus, sauf à aller pour des raisons qui n'auraient rien de scientifiques vers des rassemblements qui feraient perdre au dispositif l'essentiel de sa clarté.

À la section 33, étaient rattachées à titre secondaire 13 autres UMR se partageant entre les deux ensembles définis plus haut (6 « aires culturelles » et 7 « Histoire de l'Europe »). Avec la

création de l'AERES et la perte de l'évaluation des unités par le Comité national, ce type de rattachement a perdu de son sens puisque les sections n'ont plus qu'une connaissance très partielle de ces laboratoires. C'est l'un des problèmes induits par la création de l'AERES, qui accentue donc l'affaiblissement des capacités d'analyse des sections sur le champ qui le leur.

La structure UMR a montré, comme nous l'avons signalé, son intérêt et son efficacité dans le dispositif de recherche dans nos domaines. La montée en puissance des grandes universités et autres établissements de premier plan en matière de politique scientifique implique le développement de ces structures si le CNRS, à travers ses instituts, veut garder une capacité de coordination de la recherche publique. Ce n'est pas par le repli sur des unités propres qu'il répondra à ce défi, sauf à n'avoir comme ambition que d'être un grand établissement de recherches parmi d'autres. Cela implique d'ailleurs une réflexion et une politique sur la présence équilibrée de centres de recherches mixtes sur le territoire national.

En 2007, 18 unités en rattachement principal à la section 33 avaient une implantation unique ou principale à Paris. En 2009, ce sont 17 des 24 unités de la section qui s'y trouvent : 8 sont associées à l'EHESS (CASE, CERCEC, CRH, CRIA, Centre Chine/Corée/Japon, CETOBAC, MASCIPO), 2 à Paris 1 (IRICE, Centre d'histoire sociale du xx<sup>e</sup> siècle), 2 à Paris IV (centres André Chastel et Roland Mousnier), 1 à Paris VII (Centre Koyré), 1 à l'ENS (IHMC), 1 à l'EPHE, Paris VII et au Collège de France (Centre Chine-Japon-Tibet), 1 à Paris I, VII, X et ENS Cachan (IDHE), 1 unité propre du CNRS (IHTP) et le CEMAF qui est bilocalisé (Universités Paris I et de Provence/Aix-Marseille I), mais dont Paris est l'implantation principale. Autrement dit, la concentration qui a résulté de la disparition des FRE a renforcé un peu plus la concentration parisienne des unités en faisant disparaître de la carte les implantations de Brest et Montpellier. Dans les régions, la section 33 reste donc représentée à Aix-en-Provence (2 unités à l'Université de Provence/Aix-Marseille I et III : IREMAM et TELEMME), Caen (1 Université de Caen/Basse-Normandie :

CRHQ), Lille (1 Université Lille III/Charles de Gaulle : IRHIS), Lyon (2 dont 1 avec l'ENS-LSH et 1 avec les universités de Lyon II/Lumière, III/Jean Moulin et Grenoble II/ Pierre Mendès-France : IAO et LARHRA) et 1 à Rennes (universités de Rennes II/Haute-Bretagne, d'Angers, du Maine et de Lorient/Bretagne-Sud : CERHIO). Cette répartition géographique souligne la concentration de la recherche à Paris et sa région. Ce phénomène est encore plus accentué pour les unités relevant des « aires culturelles » puisque l'on en trouve seulement deux en région (l'IAO à Lyon et l'IREMAM à Aix), plus la partie aixoise du CEMAF.

Le rapport de conjoncture précédent signalait ce phénomène. Il s'est accentué, comme nous l'avons vu. Le rapport indiquait aussi : « Bien des équipes, surtout à Paris, manquent encore des locaux nécessaires pour accueillir les agents qui leur sont affectés, sans parler des chercheurs invités : dès lors, l'épanouissement d'une vie collective de laboratoire et l'organisation de recherches communes, dépassant les barrières disciplinaires, se heurtent à tant d'obstacles qu'ils demeurent l'exception ». Sans doute, le constat était un peu sévère et ne valait pas pour tous les laboratoires ; il n'en pointait pas moins une réalité quant aux conditions matérielles de leur fonctionnement.

La création de l'ANR et la place qu'elle prend désormais dans le financement des équipes, le développement d'autres types d'appels d'offres constituent l'une des évolutions majeures en matière de financement de la recherche ces toutes dernières années. Cette poussée des financements sur projets se traduit dans la modification de la structure des budgets. Si elle apporte des moyens supplémentaires et souvent appréciables (signe de la qualité et du dynamisme des chercheurs de la section), elle n'en pose pas moins aux unités de redoutables problèmes : complexification de la gestion, déséquilibre accentué dans la répartition des moyens entre les équipes, concurrence entre les individus, tendances centrifuges et tensions internes affaiblissant l'indispensable cohésion des laboratoires et la culture du collectif, effets pervers de financements « poli-

tiques» ou largement influencés par «l'air du temps», excessive variation des financements selon les périodes limitant les possibilités de mise en place de politiques à moyen terme. Le caractère positif du financement sur projets – à condition de mettre plus de cohérence dans les dispositifs et de mieux coordonner l'action des diverses instances nationales et européennes – ne doit pas aboutir à une diminution ou une stagnation des moyens récurrents, les seuls capables de fonder une politique d'unité et de soutenir des programmes fondamentaux – notamment avec des ambitions internationales – dans la durée. De plus, et ce n'est pas le moindre des problèmes, la maîtrise de cette diversification des financements, d'origine et de durée diverses, les problèmes de gestion découlant de l'internationalisation des recherches, posent la question du personnel capable de faire face à ces charges supplémentaires et complexes. Or les unités n'ont pas les personnels administratifs titulaires en nombre suffisant et suffisamment formés pour y faire face. La responsabilité des tutelles est engagée car il n'y aura pas de politique de recherche ambitieuse si les chercheurs n'ont pas les moyens de gérer correctement les budgets qu'ils peuvent obtenir. Et ce n'est pas par le recrutement de vacataires ou l'affectation de post-doctorants ou de doctorants en CDD sur ces tâches que l'on résoudra la question.

### **3.2 UNITÉS DE RECHERCHES À L'ÉTRANGER**

La section 33 est particulièrement concernée par le réseau des 27 UMIFRE (instituts français de recherche à l'étranger) actuellement en fonctionnement et dans lequel l'investissement est déjà très important. Ce réseau doit être un support appréciable aux renouvellements disciplinaires et thématiques. En 2008-2009, 15 de ces centres sont devenus des USR (unités mixtes de service et de recherche), sous la double tutelle du ministère des Affaires étrangères et européennes et du CNRS, avec parfois l'association d'autres partenaires français et

étrangers. Le CNRS peut désormais leur affecter davantage de chercheurs détachés ou mis à disposition, des ITA et des enseignants chercheurs en délégation. Ces équipes jouent un rôle essentiel dans la formation des doctorants et des spécialistes des régions concernées. Ces USR doivent désormais être évaluées selon une procédure à redéfinir (mais qui dépend de l'AERES...). Elles relèvent aussi des sections pour l'évaluation des chercheurs. La construction d'une politique efficace sur les «aires culturelles» et la bonne visibilité des évolutions disciplinaires et transdisciplinaires en cours, dans lesquelles ces USR peuvent jouer un rôle actif, rend indispensable une bonne circulation des informations vis-à-vis des sections et des chercheurs concernés. Il est regrettable que les nominations et les renouvellements de détachement des directeurs et des chercheurs de ces équipes ne soient soumises aux sections que pour information. Actuellement, une douzaine de chercheurs rattachés à la section 33 se trouve dans ces unités.

### **3.3 LE RÉSEAU DES MSH**

Le réseau des MSH, bien que les statuts et les modes de fonctionnement de ces Maisons soient différents, constitue un apport considérable au développement des SHS et notamment des domaines de la section 33, même s'ils se retrouvent de manière inégale dans les différentes MSH. La structure du réseau MSH constitue un renforcement de l'activité et de la visibilité de recherche en SHS. Elle permet les rapprochements, les coopérations avec les autres disciplines autour de thématiques transversales. Elle contribue à la structuration et à la mise en cohérence des recherches et peut offrir des plates-formes techniques, des services communs et des compétences mutualisés. La création des MSH offre la possibilité d'inverser la tendance à la concentration géographique, avec l'émergence de centres de recherche régionaux qui sont des références dans leur champ. L'autorité scientifique du CNRS dans les SHS dépend de son engagement réel dans

le développement et l'activité du réseau des MSH non seulement par l'implication des UMR, mais aussi par un soutien concerté et programmé à l'INSHS en cohérence avec le réseau et en tenant compte des affichages scientifiques des Maisons qui constituent le réseau et de la politique scientifique des universités qui en ont eu l'initiative.

## 4 – LES MEMBRES STATUTAIRES DES UNITÉS

### 4.1 APPRÉCIATION GLOBALE

Une analyse plus fine que celle que nous allons proposer s'imposerait en la matière. Les informations dont on dispose, tant pour le personnel CNRS que pour celui des universités et des établissements, ne sont pas suffisamment actualisées et les règles suivies par les unités dans la comptabilisation de leurs membres relèvent par trop du flou, en particulier pour les membres associés et les personnels émérites. Et ce ne sont pas les données Labintel qui peuvent être d'un grand secours tant la marge d'erreur y est grande. Par ailleurs, nous ne possédons aucune donnée sur les CDD ou vacataires présents dans les unités, en particulier ceux qui sont employés à des tâches administratives ou techniques. Il en va de même pour les post-doctorants.

Il serait indispensable en outre d'appréhender plus précisément les forces relatives pour chaque champ de la section et les perspectives d'évolution des personnes, dépendant tant du CNRS que des universités ou des établissements.

Une approche – qui ne peut être qu'imprécise et fournissant seulement des éléments de grandeur – donne aux environs de 1 160 membres statutaires dans les unités rattachées principalement à la section 33. Sur ce nombre, les enseignants-chercheurs et cher-

cheurs représentent aux environs de 950 personnes, dont 72% – un peu plus de 700 dont 145 chercheurs – relèvent des domaines de la section 33. Il faudrait y ajouter des membres associés – dont certains sont très actifs, voire dans les domaines d'érudition, indispensables au bon déroulement des recherches – et plusieurs centaines de doctorants et allocataires. À cet ensemble, il convient d'ajouter aussi les nombreux chercheurs de la section 33 qui ne se trouvent pas dans les unités qui en dépendent (voir ci-après).

Le moins que l'on puisse dire est qu'il s'agit donc d'un potentiel considérable, où, cependant, les chercheurs CNRS ne sont plus désormais qu'une minorité.

### 4.2 ITA/IATOS

Les unités en rattachement principal 33 rassemblent 216 de ces personnels dont 134 relèvent du CNRS (62%).

La situation démographique est ici aussi extrêmement préoccupante. Les problèmes de recrutement et de relais des générations se posent avec la même acuité que pour les chercheurs pour les personnels qui assurent la vie administrative et l'encadrement technique des unités. Nous avons déjà signalé la situation souvent très difficile d'une gestion devenue acrobatique et épuisante pour ceux qui l'ont en charge. Les mêmes incertitudes et des difficultés comparables existent pour les autres métiers assurés par les personnels ITA et IATOS. Le rapport de la mandature 2000-2004 indiquait déjà que « la crise de la recherche [tenait] pour une part à la crise du personnel ITA. En SHS, de nombreuses formations sont dépourvues de personnels administratifs ». Il notait « que les ITA remplissant des tâches multiples (secrétariat, comptabilité, documentation, gestion de la bibliothèque, etc.), indispensables dans les laboratoires SHS, n'ont pas un métier reconnu » et que leur carrière était bloquée. Cela est particulièrement vrai pour les agents ITA dont les tâches ont été mutuali-

sées, selon une orientation vivement encouragée par le CNRS, mais qui ne leur en assure aucune reconnaissance. Certains de ces métiers, particulièrement transversaux, vont au-delà de la vie administrative et de l'encadrement technique des unités. De ce fait, ils sont d'autant plus cruciaux qu'ils accompagnent et valorisent la recherche des unités. Ajoutons que la responsabilité des universités dans le sous-encadrement des unités ne doit pas être éludée.

Cette situation de sous-encadrement est globale. Elle est particulièrement criante pour certaines unités, notamment d'aires culturelles», ce qui nuit au rayonnement international dont elles pourraient jouir.

La section n'a pas les moyens de faire une analyse plus fine par BAP ou par âge pour les ITA du CNRS. La section n'a pas non plus la possibilité d'évaluer la place des personnels précaires dans les unités. Elle rappelle que leur bon fonctionnement – et donc celui de la recherche – bonne marche des unités dépend aussi, très largement, du travail, des compétences, des initiatives et de l'évolution de carrière de ces personnels.

### 4.3 ENSEIGNANTS-CHERCHEURS

L'analyse des données est pour cette catégorie encore plus aléatoire que pour les chercheurs. On peut estimer cependant, à partir des déclarations des unités en rattachement principal 33, qu'un peu plus de 720 enseignants-chercheurs participent, souvent activement, à leurs travaux. Sur ce nombre, 560 environ relèvent des domaines de la section, les autres ressortant surtout des sections 32, 38, 39. Ce constat est significatif de l'attraction de ces unités, de leur caractère pluridisciplinaire et du rôle qu'elles jouent dans les disciplines ou spécialités proches. Dans cette population, la proportion des « non-publiants » n'est pas significative, en particulier dans les domaines qui sont ceux de la section. De la place des enseignants-chercheurs dans les unités, témoigne

notamment la répartition des responsabilités de projets (par exemple ANR) ou d'équipes. Un signe : 13 unités de la section sur 24 sont dirigées par des enseignants-chercheurs (et 15 avec les directeurs d'études de l'EHESS). Signalons qu'aucun ou presque ne bénéficie ou n'a bénéficié de délégation pour la charge qu'ils assument.

Nous avons souligné le rôle crucial de l'investissement CNRS pour les unités d'aires culturelles», mais, y compris dans ces domaines, la place des universités et des établissements n'est pas négligeable. Seules 3 unités ont dans leur effectif de membres statutaires un peu plus de chercheurs CNRS que d'enseignants-chercheurs (le CASE, le CETOVAC, le Centre Koyré). Il est vrai que l'histoire de la France et, dans une certaine mesure, de l'Europe occidentale est très fortement représentée à l'Université et que les mondes non-européens ou à la périphérie de l'Europe de l'Ouest ne bénéficient pas souvent de l'intérêt qu'ils mériteraient. Cette disproportion est particulièrement flagrante en région, sauf exception. Dans les unités tournées vers l'histoire de la France et de l'Europe, la balance penche très fortement du côté des enseignants-chercheurs, même pour l'IHTP où ce sont là des enseignants-chercheurs au statut d'associés qui participent très largement au dynamisme des équipes.

Le problème de la relève démographique se pose aussi sur le plan des enseignants-chercheurs puisque près de 44% d'entre eux sont nés avant 1954 et 32% ont atteint 60 ans ou plus. Il est donc également de la responsabilité scientifique des universités et des établissements que d'assurer le renouvellement d'une génération qui, dans les universités, a assumé l'encadrement des étudiants au plus fort des flux et qui, dans le même temps, a construit des unités de recherche répondant aux standards internationaux.

Pour assurer au mieux cette relève, il est essentiel de développer, tant du côté du CNRS que des établissements, bourses doctorales et post-doctorales. Par ailleurs, toute la communauté s'accorde pour considérer qu'il faut privilégier le système des délégations permettant

aux enseignants-chercheurs de mener à bien des projets de recherche, plutôt que de se lancer dans un contestable dispositif de chaires qui, en instituant un statut privilégié, ne peut qu'engendrer iniquité et tension, sans aucune garantie de productivité scientifique. Il est évident, par ailleurs, que l'on ne pourra assurer la continuité et le renouvellement à la tête des unités si les tutelles n'instituent pas un système permanent et attractif de délégations.

Ajoutons que la disparition des détachements qui permettaient à de jeunes fonctionnaires, enseignants du secondaire pour la plupart, de terminer une thèse a des effets extrêmement dommageables dans nos domaines de recherches. Ce vivier de chercheurs, assez particulier aux études en LSH, joue un rôle notable dans le renouvellement de leurs effectifs chercheurs, puisque nombre de ceux qui veulent s'engager dans cette voie commencent par présenter les concours de l'enseignement et ne candidatent pas forcément à une allocation. Le passage par l'enseignement secondaire continue à dominer le parcours de beaucoup de doctorants, puis de docteurs jeunes. Ignorer cette situation pour privilégier un seul modèle de recrutement, calqué sur les sciences dites « dures », conduit à affaiblir nos disciplines. Il conviendrait au contraire d'encourager l'aboutissement des thèses des enseignants du secondaire et de leur donner la possibilité de se lier mieux à la vie des laboratoires. Le retour au dispositif des détachements devrait être un objectif de l'INSHS. L'irrigation scientifique du monde de l'enseignement secondaire (et au-delà) et la vitalité de pans entiers de la recherche en histoire moderne et contemporaine en dépendent pour une large part.

## 4.4 CHERCHEURS

Dès 2006, la section signalait que le nombre de postes de chercheurs CNRS ouverts chaque année était notablement inférieur au nombre des départs à la retraite et que cette perte de substance n'était pas compensée par une augmentation du nombre des enseignants-

chercheurs dans les spécialités rares : de ce fait, certaines étaient menacées de disparition, quand elles n'avaient pas déjà disparu.

En 2008, on pouvait évaluer autour de 220 le nombre de chercheurs rattachés à la section 33 et en activité. Ils n'étaient plus que 205 fin 2009 et, sur ce nombre, certains, sont déjà partis à la retraite. La diminution est donc rapide. Nous reviendrons sur cette question, mais cette affaiblissement est le premier constat qui s'impose.

Un deuxième constat concerne la répartition de ces chercheurs entre les unités de recherches : ils sont éparpillés entre 60 unités (46 UMR, 1 UPR, 9 USR, 3 FRE, 1 EA). Les 24 unités en rattachement principal en 33 comptent 145 de « ses » chercheurs, soit 71 % de l'ensemble. Autrement dit, un tiers des chercheurs de la section se trouve dans des unités qui sont, soit en rattachement secondaire (13), soit sans lien avec elle (45), et donc hors du périmètre de la désormais très relative expertise de la section. L'absurdité du découplage entre l'évaluation des unités et celle des chercheurs qui résulte de la création de l'AERES est ici flagrante. Elle pose un problème pour les chercheurs se trouvant dans des unités en rattachement principal. Que dire alors pour ceux qui n'en sont pas et qui appartiennent à des laboratoires sur lesquels la section ne possède aucune possibilité de regard ou d'information ? Non seulement il s'agit d'un nombre non négligeable de personnes, mais, en outre, pour certaines de ces unités, le groupe concerné est conséquent : 8 pour l'UMR 8582 (Groupe de sociologie des religions), 7 pour l'UMR 8564 (Inde et Asie du Sud), 6 pour l'UMR 8177 (Orient & Méditerranée), 5 pour l'UMR 7528 (Mondes iranien et indien). La répartition des spécialisations de recherches représentées dans la section doit tenir compte de cet éparpillement. Il donne à certains domaines un peu plus d'assise, sans que celle-ci puisse être jugée satisfaisante : 36 chercheurs de la section travaillent sur le monde arabo-turc et le Moyen-Orient dans 9 unités (plus des centres extérieurs), 33 sur le monde asiatique dans 8 unités, 24 sur l'Afrique subsaharienne dans 3 unités, 16 en Histoire de l'art européen dans 6 unités.

Pour ce qui concerne les unités en rattachement principal, elles comprennent autour de 230 chercheurs au total dont les 145 rattachés en 33, les autres relevant d'autres sections de l'INSHS, la 38, la 32 ou la 39 notamment. Les unités qui ont (ou avaient pour certaines si l'on tient compte des départs à la retraite) le plus de chercheurs relevant de la section 33 sont le CRH (12 sur 24 chercheurs), le CETOBAC (11 sur 16), le Centre de recherches sur les civilisations chinoise, japonaise et tibétaine (11 sur 11), l'IHMC (9 sur 9), l'IRICE (7 sur 7) et le Centre Chastel (8 sur 9), le CERCEC (8 sur 8), le CHSXX (7 sur 10) et le Centre Chine, Corée, Japon (7 sur 13), l'IREMAM (7 sur 18). La plupart de ces unités se retrouvent parmi celles qui concentrent le plus de chercheurs toutes sections confondues, mais s'y ajoutent le MASCIPO, le CASE, le CEMAF, l'IDHE et le Centre Koyré (avec 10 chercheurs ou plus). On notera les traits relevés plus haut : présence plus significative des chercheurs dans les unités d'« aires culturelles » et à Paris. Plus de 80 % des chercheurs sont affectés dans des laboratoires parisiens et les affectations qui ont suivi les recrutements de ces dernières années, malgré des velléités passagères de déconcentration, ont renforcé la tendance.

Sur les 205 chercheurs en 33 recensés, 90 sont des femmes, soit 44 %, mais on ne peut que relever l'écart qu'il y a entre cette proportion et celles des directrices de recherche. En effet, sur les 71 DR recensés, les femmes sont au nombre de 19, soit 27 %.

En 2009, on comptait 43 chercheurs ayant dépassé les 60 ans, soit 21 % de l'effectif (dont 21 nés en 1946 ou 1947). Au total, à peu près de 40 % des chercheurs avaient atteint ou dépassé les 55 ans. Entre temps, une demi-douzaine est déjà partie à la retraite, rendant notre évaluation des effectifs par laboratoire obsolète. Cela se passe de commentaires. Nous avons déjà signalé que l'avenir était obéré, voire compromis dans certains cas. La projection 2006-2015, effectuée lors de la mandature précédente, avait conclu à la nécessité de recruter 7 à 8 chercheurs par an pour maintenir les effectifs...

Nous terminerons ce rapport par là.

## 5 – ÉVOLUTION RÉCENTE DES RECRUTEMENTS DE CHERCHEURS

Depuis 2001, 58 chercheurs ont été recrutés par les jurys issus de la section 33. Après une période de baisse (on est passé de 9 recrutements en 2001 à 5 entre 2003 et 2005), une remontée s'est opérée pour retrouver le chiffre de 9 en 2008, avant de retomber à 5 en 2009 et à 4 en 2010, soit *le point le plus bas de la décennie*, dans la situation démographique qui a été dite.

Ces recrutements ont renforcé la concentration parisienne : 42 recrutements pour 16 en région (7 à Aix, 4 à Lyon, 1 à Caen, Lille, Lyon, Rennes, Toulouse et Angers).

### Récapitulatif des recrutements depuis 2005

	Paris-RP	Province	Total = 100 %
CR2	13 soit 72,2 %	5 soit 27,8 %	18
CR1	13 soit 86,7 %	2 soit 13,3 %	15
Total	26 soit 78,8 %	7 soit 21,2 %	33

Sur les 29 laboratoires concernés par ces apports, ceux qui en ont principalement profité ont été le CRH et le CEMAF (5), le CERCEC (4), le CETOBAC, l'UMR 7528 Mondes iraniens et indiens, l'IREMAM, l'IHMC, le centre Koyré (3).

Si l'on tente une grossière répartition entre les domaines, il ressort d'abord une grande variété des thématiques sélectionnées avec quelques choix significatifs pour les mondes non-européens, même si l'histoire européenne reste dominante. Le monde asiatique a bénéficié de 11 recrutements (Chine 3, péninsule indochinoise 3, Asie centrale 2, Japon, Corée, Indonésie), 8 pour l'ensemble arabo-turc et le Moyen-Orient (3 Empire ottoman, 2 Proche-Orient, 2 Iran, Maghreb), 5 pour l'Afrique sub-saharienne, mais 2 seulement pour les Amériques.

La répartition, tout aussi grossière en spécificités, fait apparaître 8 recrutements pour

l'histoire de l'Europe du XXe siècle (dont 5 autour de la Seconde Guerre mondiale) et 4 pour la France du XXe siècle, 7 en histoire de l'Europe moderne (hors histoire de l'art et des sciences), 6 en histoire des sciences (période moderne et Extrême-Orient), 5 recrutements en histoire de l'art (dont 2 en art chi-

nois), 5 pour l'histoire de l'Islam. Il va sans dire que l'effort de recrutements équilibrés qui a été le fait des divers jurys et qu'illustrent les éléments ci-dessus reste bien en deçà des nécessités pour que la recherche publique française réponde dans nos domaines aux défis qu'on lui assigne de relever.

## ANNEXE : SIGLES

AERES Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur

ANR Agence nationale de la Recherche

CASE Centre Asie du Sud-Est UMR 8170

CEMAF Centre d'études des mondes africains UMR 8171

CERCEC Centre études des mondes russes, caucasien et centre-européen UMR 8083

CERHIO Centre de recherches historiques de l'Ouest UMR 6258

CETOBAC Centre d'Etudes Turques, Ottomanes, Balkaniques et Centrasiatiques UMR 8032

CHSXX Centre d'histoire sociale du xx<sup>e</sup> siècle UMR 8058

CRH Centre de recherches historiques UMR 8558

CRHQ Centre de recherches d'histoire quantitative UMR 6583

CRIA Centre recherches interdisciplinaire sur l'Allemagne UMR 8131

EHESS École des Hautes Études en Sciences sociales

ENS École normale supérieure

ENS-LSH École normale supérieure-Lettres Sciences humaines

EPHE École pratique des Hautes Études

IAO Institut d'Asie orientale UMR 5062

IDHE Institutions et dynamiques historiques de l'économie UMR 8533

IHMC Institut d'histoire moderne et contemporaine UMR 8066

IHTP Institut d'histoire du temps présent UPR 301

INSHS Institut national des Sciences humaines et sociales

IREMAM Institut de recherches sur le monde arabo-musulman UMR 6568

IRHIS Institut de recherches historiques du Septentrion UMR 8529

IRICE Identités, relations internationales, civilisations de l'Europe UMR 8138

ITA Ingénieurs, techniciens et administratifs

IATOS Ingénieurs, administratifs, techniciens, ouvriers et personnel de service

LARHRA Laboratoire de recherches historiques Rhône-Alpes, UMR 5190

LSH Lettres Sciences humaines

MASCIPO	Mondes américains : sociétés, circulations, pouvoirs xv <sup>e</sup> -xxi <sup>e</sup> siècles UMR 8168	UMR	Unité mixte de recherches
MSH	Maison des Sciences de l'Homme	UPR	Unité propre de recherches
SHS	Sciences humaines et sociales	USR	Unité mixte de services et de recherches
UMIFRE	Unité mixte des Instituts français à l'étranger	TELEMME	Temps, espaces, langages, Europe méridionale, Méditerranée, UMR 6570



# 34

---

## LANGUES, LANGAGE, DISCOURS

### *Président*

Christian HUDELOT

Anne ABEILLÉ

Nicholas ASHER

Gabriel BERGOUNIOUX

Colette BERNARD

Claire BEYSSADE

Isabelle BRIL

Éva BUCHI

Michel CHAROLLES

Francis CORBLIN

Bénédicte GUILLAUME

Sylvie MELLET

Christine MEUNIER

Lorenza MONDADA

Daniele MONSEUR

Noël NGUYEN

Thierry OLIVE

Martine VANHOVE

Sophie WAUQUIER

Chantal WIONET

La section 34 «Langues, langage, discours» (qui a fait suite à la Section «Sciences du langage» créée au CNRS en 1982) regroupe un champ d'investigations ayant la linguistique comme centre de gravité. Science autonome et diversifiée, la linguistique a pour objectif l'étude scientifique du langage humain à travers l'analyse de la diversité des langues, de leurs propriétés universelles et de leurs propriétés particulières, de la dynamique de leur expansion et de leur diversification diachronique, diatopique et sociale. Cette discipline se situe au carrefour des sciences cognitives et des technologies de l'information puisque le langage et son étude offrent un moyen d'accès à la pensée humaine et aux mécanismes de traitement de l'information permettant d'acquérir, d'utiliser et de transmettre des connaissances.

Dans la mesure où le langage apparaît comme une des capacités spécifiques à l'espèce humaine, mais comme également les langues diffèrent et doivent être apprises dans des groupes sociaux, la linguistique se trouve nécessairement à l'intersection des sciences humaines et sociales, et des sciences de l'esprit. Cette position se manifeste dans le fait que les Unités de recherches qui relèvent de la section 34 tissent des liens non seulement avec d'autres sections de l'INSHS, mais également avec d'autres instituts et principalement l'INS2I et l'INSB. Ainsi, alors que 16 UMR et 1 GDR ont la section 34 comme seule section de rattachement, 5 UMR ont également un lien avec la section 7 et 4 UMR et 1 GDR un lien

avec la section 27, tandis qu'une UPR et un GDR associent entre autres les sections 07, 27 et 34. Dans la mesure où la section recrute de jeunes chercheurs dont les projets sont de plus en plus fréquemment à l'interface de la linguistique et du traitement automatique ou des neurosciences intégratives, ce mouvement est appelé à s'amplifier.

On notera qu'au sein même du CNRS les redécoupages successifs n'ont pas encore entraîné un rattachement de toute la recherche centrée sur le langage humain dans la section 34. Sans doute un certain nombre de chercheurs préfèrent-ils encore mener leurs recherches dans le cadre d'équipes dont les centres d'intérêts dominants sont soit des aires linguistiques spécifiques, soit la psychologie, soit l'informatique. Toutefois les évolutions actuelles et la politique volontariste du CNRS en faveur de l'interdisciplinarité incitent les chercheurs à se regrouper en fonction de leur objet d'étude commun et à rejoindre la section 34. Il s'agit néanmoins d'une évolution lente dont le mouvement est loin d'être achevé.

On se doit, pour tenir compte de la place des sciences du langage dans le paysage de la recherche en France, de mentionner une différence notable qui existe dans la structuration des disciplines entre le CoNRS et la CP-CNU. Certes, la section 34 du CNRS recoupe principalement la section 07 du CNU Sciences du langage : linguistique et phonétique générales, mais du fait de la structuration de l'enseignement supérieur par grandes aires linguistiques, des linguistes sont également inscrits dans les sections 08 langues et littératures anciennes ; 09 langue et littérature françaises ; 11 langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes ; 12 langues et littératures germaniques et scandinaves ; 13 langues et littérature slaves ; 14 langues et littérature romanes : espagnol, italien, portugais ; 15 langues et littératures arabes, chinoises, japonaises, hébraïques ; 73 cultures et langues régionales ; etc. Notons que l'on trouve aussi dans la section 27 informatique, des linguistes qui travaillent sur l'interface avec le traitement automatique des langues et dans la section 16 psychologie, des linguistes qui s'intéressent aux questions d'acquisition.

Enfin, il convient de souligner que les recherches françaises dans le domaine des sciences du langage s'appuient sur des collaborations internationales nombreuses et durables, dans le cadre de projets ERC, de projets ANR binationaux, de PICS, etc.

## 1 - L'ÉTUDE DU LANGAGE HUMAIN

La présentation qui suit tente de montrer la dialectique constitutive de la section entre diversité des approches théoriques et méthodologiques et unité de l'objet d'étude : c'est bien le souci constant de comprendre le fonctionnement du langage et des langues qui assure la cohésion de l'ensemble des recherches couvertes par (ou accueillies au sein de) la 34.

### 1.1 LINGUISTIQUE GÉNÉRALE

La linguistique générale a pour but l'étude du langage et des langues dans leur diversité et par delà la diversité des langues. Elle se nourrit d'un aller retour entre le développement de théories et de modèles d'analyse et la mise à jour de données nouvelles dans des langues variées dont l'étude des structures et des propriétés est au cœur de la discipline.

Elle a une interaction forte avec le domaine de la cognition, de la psycholinguistique, du traitement automatique, comme en témoigne le nombre de laboratoires rattachés à la fois aux sections 34 et 27 ou 35 ; dans ces interactions fructueuses, les linguistes doivent veiller à apporter leur expertise de linguistes.

#### Domaines de la linguistique générale

La linguistique générale se subdivise en différents sous-domaines : phonétique, phono-

logie, morphologie, syntaxe, sémantique, pragmatique, qui s'intéressent aux sons, aux mots, aux phrases ou aux discours.

## **Phonétique**

La phonétique et la phonologie étudient la forme sonore du langage. Alors que les travaux en phonologie se concentrent davantage sur des aspects systémiques, la phonétique trouve son champ d'investigation dans l'observation des réalisations physiques et physiologiques des sons. Toutefois, les limites entre les deux disciplines sont de plus en plus poreuses dans la mesure où la phonologie nourrit désormais souvent ses modèles à la lumière de données empiriques et que les analyses phonétiques sont systématiquement mises en perspective avec les structures des systèmes phonologiques et le fonctionnement de la parole dans sa globalité (en lien avec les autres domaines linguistiques comme la morphologie, la syntaxe, le discours ou encore la pragmatique). Ainsi la phonétique, souvent désignée aujourd'hui sous le terme plus large de « sciences de la parole », déploie ses activités dans des champs assez variés nécessitant des collaborations interdisciplinaires (voir section 1.2). Son objectif principal est de comprendre les processus de production et de perception de la parole. Cet objectif est nourri par des recherches concernant des aspects historiques (changement phonétique), cliniques (description des pathologies de la parole), statistiques (exploitation des grands corpus de parole). Ses méthodologies sont le plus souvent expérimentales et les analyses traditionnelles de la parole (acoustiques et articulatoires) sont désormais complétées par les développements récents d'autres disciplines scientifiques (psychologie, neurosciences, traitement automatique).

## **Phonologie**

Les recherches en phonologie se déploient selon un spectre qui va de l'émergence des structures sonores à partir du traite-

ment du signal – comme en témoigne le courant de la phonologie de laboratoire (Labphon) – jusqu'à des formalismes intégrés à la linguistique cognitive. Entre la connivence avec la phonétique expérimentale et l'ajustement mentaliste, un certain nombre d'écoles, le plus souvent issues du générativisme, témoignent de la vitalité du domaine, que soient interrogés les composants ultimes (phonologie des traits), la constituance prosodique (théorie métrique), les contraintes de combinaison (théorie de l'optimalité) ou l'interaction entre phonologie et morphologie (CVCV). Ces études ont des répercussions importantes pour des secteurs aussi divers que l'acquisition du langage et la linguistique clinique, les travaux sur la graphie ou sur la poétique.

## **Morphologie**

Les recherches en morphologie sont centrées sur la question de la formation et de la structure des mots, qu'on entende par là les unités constitutives du lexique (morphologie constructionnelle) ou les unités qui constituent les atomes de la syntaxe (morphologie flexionnelle). Elles se sont organisées au cours des dernières années autour de la morphologie lexématique, qui met en doute l'idée selon laquelle les mots sont formés par la simple concaténation d'unités de base appelées morphèmes et soutient au contraire que l'unité de base est le lexème et que les mots sont construits par application de fonctions à ces lexèmes.

La morphologie constructionnelle est maintenant conçue comme une composante unique, à cause de sa relation particulière au lexique. Les différents modes de formation (dérivation, composition, conversion) et types de construction de la forme (concaténation, altération radicale, application d'un patron, etc.) sont étudiés en tant que tels au sein de cette composante. En morphologie flexionnelle, la période récente a vu une réanalyse morphologique de nombreux phénomènes qui étaient précédemment conçus comme relevant de la phonologie (allomorphies du radical, classes flexionnelles, syncrétismes, etc.). La

question du rôle des paradigmes est redevenue centrale dans les débats.

Deux tendances lourdes traversent l'ensemble du champ : d'une part, l'exploitation systématique de ressources électroniques (corpus, bases de données) et l'approche typologique de la morphologie qui ont radicalement amélioré la finesse et l'empan des descriptions ; d'autre part, les travaux à l'interface avec la psycholinguistique, en particulier autour des questions du lexique mental et de l'acquisition des relations morphologiques.

## **Syntaxe**

Les recherches en syntaxe concernent les catégories grammaticales, la structure des phrases et l'ordre des mots. Elles concernent aussi bien la comparaison des langues, l'histoire et l'évolution des langues, que la description des langues en synchronie (en tenant compte de la variation dialectale).

Des recherches nouvelles se déploient sur l'interface entre la syntaxe et la sémantique, la pragmatique ou la prosodie, mais aussi sur la syntaxe des langues rares ou peu connues, et en ce qui concerne les langues européennes, sur la syntaxe des usages oraux ou informels.

Les recherches en syntaxe sont menées dans des cadres théoriques variés : fonctionnel, typologique, grammaires de construction d'inspiration cognitive, grammaire générative dans ses diverses versions, dont les grammaires d'unification (ou grammaires de contraintes).

Ces recherches donnent lieu à la constitution de grammaires de référence et de dictionnaires enrichis d'informations syntaxiques (cf. § 4.1 sur les ressources linguistiques).

## **Sémantique**

Les recherches en sémantique modélisent le sens des mots, des phrases, des textes et des discours. La sémantique lexicale s'intéresse au sens des mots et morphèmes et aux relations de

sens entre les mots (synonymie, polysémie, antonymie...). La sémantique compositionnelle s'intéresse à la façon dont on calcule le sens des unités de taille supérieure aux morphèmes ou mots (syntagmes, phrases, textes ou discours). L'idée est que le sens d'un tout est toujours fonction du sens de ses parties et de leurs modes de composition : ainsi par exemple, à partir d'une représentation du sens des mots et de la façon dont ils sont agencés dans une phrase (structure syntaxique), on calcule de façon récursive une représentation du sens de la phrase. On peut distinguer au moins deux grands courants dans les études en sémantique.

La sémantique d'inspiration cognitive, quant à elle, met l'accent sur la compréhension du langage conçue comme un processus mental. Elle rejette l'idée d'une autonomie du langage par rapport à la cognition, postule l'existence d'invariants non linguistiques et met en avant les notions d'élaboration mentale et de représentation mentale des significations.

Pour représenter la signification des mots et des textes, il est fréquemment fait usage de réseaux sémantiques inspirés de la théorie des graphes en mathématiques, et de « frames ». Ces dernières années, de nombreux travaux ont été menés, à la fois par des linguistes, des philosophes et des psychologues sur la cognition située : les linguistes cognitivistes affirment en effet que le langage est toujours à la fois « incarné » et « situé » dans un environnement spécifique.

La sémantique vériconditionnelle assimile le sens d'une phrase à ses conditions de vérité. Dans les dernières décennies, les travaux menés sur la sémantique des temps verbaux, des indéfinis, des anaphores et des présuppositions ont suscité l'émergence de théories sémantiques dites dynamiques qui visent à rendre compte du flux informationnel lié à la dynamique du discours : la signification linguistique est conçue comme une fonction qui modifie le contexte discursif, et ne s'analyse pas uniquement en termes d'impact sur les conditions de vérité de l'énoncé. Dans la période récente, les recherches ont porté à la fois sur des questions explorées depuis longtemps comme l'étude des expressions quantifiées et de choix libre (tel

*n'importe quel*) ou l'analyse des modalités et sur des champs nouvellement ouverts comme l'analyse du sens des énoncés non assertifs (questions, ordres...) ou la question de la répartition du travail entre sémantique et pragmatique (dans le traitement des implicatures et des présuppositions au travers de la question des différents niveaux de sens ou dans l'analyse des relations rhétoriques).

La sémantique dynamique a étendu les méthodes de la sémantique compositionnelle au-delà de la phrase jusqu'au traitement des discours et même des dialogues. Il y a des interactions importantes entre la sémantique dynamique et les développements en logique et en informatique théorique : des chercheurs français ont montré par exemple comment enchâsser la sémantique dynamique dans le cadre de la logique du deuxième ordre de Montague en utilisant la méthode des continuations de l'informatique théorique.

## **Pragmatique**

Les travaux en pragmatique s'occupent des enrichissements de la sémantique qui sont dus à la prise en considération du contexte d'énonciation. La frontière entre la sémantique et la pragmatique est un sujet de débat dans la philosophie contemporaine du langage et beaucoup de linguistes considèrent que la frontière entre les deux domaines est flexible. La période récente a continué à interroger ces frontières en s'orientant vers une pragmatique de type formel et en discutant la manière dont la valeur pragmatique des items particuliers se combine dans l'interprétation des phrases complexes. Parallèlement, des travaux récents à l'interface de la linguistique et de la psychologie expérimentale ont entrepris de mettre à l'épreuve un certain nombre de propositions théoriques concurrentes. Ces travaux portent en particulier sur les présuppositions, les implicatures scalaires et la contribution au sens des relations discursives et de la structure discursive d'un texte ou d'un dialogue.

La pragmatique s'est développée en interrogeant de manière féconde ses interfaces avec

la syntaxe, la prosodie et, plus récemment, avec la gestualité et la multimodalité, montrant l'importance d'approches multi-dimensionnelles et multi-fonctionnelles, et d'une conception du langage qui intègre pleinement ses dimensions situées et contextuelles. De manière plus générale, la pragmatique s'est élargie aux analyses du discours et à la linguistique de l'interaction, qui ont permis une étude des structures de la langue telles qu'elles émergent et se développent dans ses usages situés dans le dialogue, la conversation et des situations de communication spécifiques (cf. § 2.5).

La pragmatique, tant dans sa dimension discursive que dans sa dimension formelle est bien représentée en France.

## **Texte & Discours**

Les linguistes travaillant sur les textes et les discours se doivent de rassembler, structurer et décrire leurs objets empiriques pour les constituer en observables, c'est-à-dire en objets scientifiques construits sur la base desquelles ils peuvent élaborer des hypothèses explicatives et des modélisations susceptibles de représenter leurs fonctionnements et de fournir par là même les bases d'un dialogue fructueux notamment avec les sciences cognitives. Une telle construction oblige à définir les unités textuelles et discursives élémentaires, à penser leur articulation et à appréhender leur combinatoire (nécessairement complexe puisque ces unités sont de différents niveaux : lexical, syntaxique, sémantique, discursif, etc. et que ces niveaux se superposent, s'imbriquent), à enrichir les corpus et à se doter des outils logiciels et des méthodologies nécessaires à leur traitement (on rejoint ici certains aspects du TAL). Un tel outillage est aujourd'hui indispensable pour appréhender les structures informationnelles et rhétoriques des textes et des discours.

Les modèles spécifiquement dédiés au discours, comme ultime palier d'organisation du langage, ont une couverture plus ou moins large. Les modèles les plus formels (comme la « Rhetorical Structure Theory »)

reposent sur un répertoire de relations de discours dont l'affectation s'effectue au fur et à mesure de l'avancée du texte. Ils peuvent également (comme la «Segmented Discourse Representation Theory») prendre en compte les relations entre les référents (entités, propositions et situations) et inclure des procédures de mise à jour. Parallèlement à ces modèles, un grand nombre d'analyses linguistiques locales (fondées sur des corpus de langue écrite ou parlée) qui ne couvrent pas l'ensemble des niveaux de structuration des discours, portent sur des items comme les anaphores et les connecteurs, dont l'interprétation ne peut être établie indépendamment de ce qui a été dit ou écrit précédemment, ou sur des expressions fixant des repères pour l'interprétation de ce qui va suivre.

L'analyse du discours a été en outre fortement renouvelée par l'analyse de la langue orale en interaction, proposée notamment par la linguistique interactionnelle inspirée de l'analyse conversationnelle, la linguistique fonctionnelle et la grammaire de construction. L'enjeu est de montrer le lien entre l'organisation de la grammaire et des ressources linguistiques, l'organisation des environnements séquentiels dans lesquels elles sont utilisées en interaction et l'organisation de l'action pratique qu'elles accomplissent. Cela donne lieu à des analyses de la syntaxe, de la prosodie, du lexique, des particules discursives telles qu'elles se déploient dans des contextes d'usage précis. Cela permet aussi une meilleure connaissance de l'organisation interactionnelle, domaine d'émergence du changement linguistique.

## Modélisation

Les théories linguistiques, comme celles issues des grammaires génératives ou des grammaires catégorielles, peuvent être formalisées. Les recherches en linguistique formelle se caractérisent par une grande variété de modèles, dont les propriétés formelles peuvent être étudiées en tant que telles. La sémantique formelle par exemple utilise comme langage de représentation le langage de la logique, du premier ou du deuxième ordre. En France, des

chercheurs de renommée internationale travaillent dans plusieurs laboratoires du CNRS sur la question du pouvoir expressif des langages formels utilisés pour modéliser différentes propriétés des langues naturelles.

Cette activité est importante de plusieurs points de vue. Les fondements formels d'un modèle linguistique peuvent être évalués en termes de complexité ou de vraisemblance cognitive, et comparés à d'autres modèles linguistiques, et plus généralement à d'autres systèmes cognitifs. Les langages de formalisation peuvent permettre la réalisation de programmes informatiques qui implémentent le modèle, et sont utiles en traitement automatique des langues (voir partie 4).

## Histoire des théories linguistiques

La connaissance des travaux antérieurs est une condition des avancées de la discipline dans une perspective cumulative. Comme l'a dit Bachelard, une science est condamnée à répéter les erreurs dont elle n'a pas gardé la mémoire. L'histoire de la linguistique est sollicitée dans trois dimensions. La première, descriptive, entend corriger, éditer et présenter les travaux passés dans une démarche documentaire qui s'apparente à celle du philologue : les «humanités digitales», en cours de développement, en sont une illustration. La seconde, critique, propose une évaluation des analyses produites à l'aune de celles qui ont déjà été faites, que cette antériorité remonte à des siècles ou à quelques années, comme il en va des discussions continues, depuis Aristote jusqu'aux philosophies du langage ordinaire, concernant le type de relation à établir entre logique et langage. La troisième, heuristique, entre dans le panorama plus général de l'épistémologie en décrivant dans quelles conditions intervient et se sanctionne une découverte dans les sciences du langage.

## 1.2 LES SCIENCES DE LA PAROLE

La parole est un sujet d'étude fondamentalement pluridisciplinaire dans la mesure où il concerne à la fois des aspects linguistiques (spécificités des systèmes linguistiques), des aspects fonctionnels du corps humain (implication des organes de la parole, mais aussi des yeux, des mains), des aspects cognitifs (programmation, perception), et des aspects physiques (signal de parole). Cette pluridisciplinarité est depuis longtemps structurante pour les recherches sur la parole et elle continuera à l'être dans les années à venir.

Un axe de recherche très actuel vise à établir des liens entre génétique, évolution des systèmes phonologiques et ontogenèse de la parole. On cherche par exemple à caractériser avec précision les contraintes articulatoires, acoustiques, perceptives et cognitives susceptibles de s'exercer sur l'architecture des systèmes phonologiques, grâce à des études expérimentales à cheval entre la phonologie, la phonétique et la psychologie cognitive. Ces recherches ont parfois pour objectif de reproduire en laboratoire les phénomènes dont on suppose la mise en jeu dans l'évolution des systèmes phonologiques. Il est par ailleurs largement fait recours aux modèles computationnels (modèles connexionnistes, systèmes artificiels multi-agents, etc.) dans le but de simuler la manière dont les unités phonologiques peuvent émerger dans la mise en relation entre son et sens.

Depuis quelques années, les collaborations entre phonéticiens et médecins cliniciens se sont renforcées dans le but d'aboutir à une description plus objective et à grande échelle de la parole pathologique. Ces travaux visent aussi à mieux cerner les mécanismes cérébraux en jeu dans la production et le traitement de la parole chez le sujet normal à la lumière des études réalisées sur des sujets cérébro-lésés. Ces collaborations, fructueuses, sont appelées à s'étendre davantage encore.

La prosodie a été longtemps négligée ou envisagée comme un composant marginal du

champ de la linguistique, voire exclue de ce dernier. Le développement considérable des recherches sur la prosodie au cours des dernières décennies est ainsi à la fois le reflet et l'un des moteurs de l'évolution des paradigmes de la linguistique contemporaine. L'avènement de la phonologie plurilinéaire, l'extension du champ d'investigation de la linguistique aux usages langagiers dans le dialogue et la conversation quotidienne, l'intérêt porté au rôle de la prosodie dans l'acquisition du langage par l'enfant, forment quelques-uns des éléments dans cette évolution qui se poursuit aujourd'hui au travers de multiples travaux.

La parole est une activité qui implique le corps humain au travers des organes de la parole (langue, lèvres, larynx, etc.) mais aussi au travers de l'ensemble des gestes qui accompagnent et structurent la parole comme les mouvements des sourcils, ceux des mains, la posture, etc. De nombreuses recherches se développent à la fois sur l'extraction du sens et la codification des gestes en lien avec la parole, mais aussi sur la structuration des discours et des interactions dans des situations de parole naturelle.

Ces recherches vont de pair avec un courant bien engagé en phonétique depuis une décennie et qui consiste à observer les caractéristiques de la parole sur de très larges corpus de parole naturelle (non contrainte). Les outils automatiques de traitement de la parole permettent désormais d'envisager l'exploitation de très gros corpus pour élargir nos connaissances sur les contraintes de production et de perception de la parole en condition naturelle, c'est-à-dire avec l'ensemble des facteurs liés à la communication (sources de variations de la parole).

Il existe entre les recherches sur la forme sonore du langage et le traitement automatique des langues (TAL) des connexions bien établies depuis longtemps. La construction des systèmes de synthèse et de reconnaissance automatiques de la parole en a été l'un des moteurs. Au cours de ces dernières années, ces relations se sont renforcées sous l'influence de différents facteurs. Le premier point de convergence tient aux techniques de recueil

et d'exploitation partagée des ressources considérables dont nous disposons à présent dans le domaine de l'oral. Le second point de convergence est lié à l'intérêt croissant des spécialistes du TAL pour les langues parlées. Dans les recherches sur l'oral, on voit ainsi se généraliser l'utilisation d'un large ensemble d'instruments et de méthodes permettant de procéder de manière automatique au traitement et à l'analyse des données recueillies. Les études sur corpus de grande ou très grande taille menées en phonologie et en phonétique, font ainsi de plus en plus souvent appel à des outils initialement développés en TAL. Les spécialistes du TAL et les phonologues/phonéticiens ont également contribué de manière conjointe au développement des systèmes d'annotation multi-niveaux.

## **2 – ÉTUDES DES LANGUES ET DES DISCOURS**

### **2.1 ÉTUDE DES LANGUES DANS LEUR DIVERSITÉ**

L'étude et la description des langues dans leur diversité et sous tous leurs aspects (phonique, morpho-syntaxique, lexical, sémantique) constitue un des pôles essentiels de la discipline et a des implications pour la typologie des langues et les sciences cognitives.

Outre les connaissances nouvelles qu'elles apportent sur les familles de langues, leur histoire et leur comparaison, les données collectées permettent l'émergence de problématiques nouvelles en mettant les théories à l'épreuve des faits : il n'est pas rare que l'on découvre des données qui falsifient les prédictions des théories et qui obligent à les réviser.

La constitution de grammaires et de dictionnaires est d'une utilité fondamentale pour les chercheurs comme pour les locuteurs des langues. Cette documentation est la base indis-

pensable des recherches typologiques et comparatives. Elle permet d'enregistrer des états de langue, clé essentielle pour leur comparaison et pour la compréhension de leur évolution. Les dictionnaires mettent à la disposition des chercheurs des bases lexicales indispensables à toute entreprise de comparatisme historique et de reconstitution du vocabulaire de base commun à une famille donnée.

Enfin, la mise en œuvre de systèmes d'écriture dans des langues à tradition orale, les dictionnaires ou atlas encyclopédiques permettent aussi de sauvegarder la diversité du patrimoine linguistique et culturel et se font en étroite relation avec le domaine très dynamique de l'anthropologie linguistique (Hymes, Duranti) et de l'anthropologie-ethnologie en général.

La France a une longue tradition de recherches qui concerne aussi bien les langues anciennes, le français dans sa diversité, et les langues du monde. Deux fédérations couvrent ces différents domaines, l'ILF (Institut de Linguistique Française), et la Fédération T.U.L (Typologie et Universaux du Langage) et plusieurs laboratoires du CNRS se consacrent à cette tâche : citons à titre d'exemple les langues du Caucase, tibéto-birmanes, africaines, amérindiennes ou de la région Asie-Pacifique.

Le CNRS a une mission plus particulière concernant les langues autochtones d'Outremer, faisant partie des « Langues de France » et pour lesquelles les travaux des linguistes français ont des applications immédiates dans l'enseignement primaire, secondaire et universitaire.

Le départ à la retraite dans les cinq prochaines années d'un grand nombre de spécialistes de renom risque, si une politique de recrutement de jeunes chercheurs n'est pas mise en place, de mettre à mal des domaines dans lesquels la recherche française s'est distinguée et est reconnue au plan international.

### **2.2 TYPOLOGIE LINGUISTIQUE**

En dépit de la grande diversité des langues du monde, des traits et des phénomènes

structurels et fonctionnels communs, parfois appelés universaux (mais ce sont surtout des universaux statistiques, les universaux absolus étant rares), ont été recensés.

Des traits et phénomènes relevant de divers sous-domaines (phonologie, morpho-syntaxe et sémantique) s'organisent en types dont on analyse la distribution et la co-occurrence avec d'autres phénomènes pour mettre en évidence des corrélats et dégager des implications ou des universaux implicationnels : par exemple, si une langue a des phrases à verbe final elle a normalement des postpositions.

Parmi les domaines d'investigation des typologies, citons notamment la typologie tonale, l'ordre des mots, les structures et marques d'actance et types d'alignement morpho-syntaxique, le type de dépendance avec marquage sur la tête ou sur le terme dépendant, la constitution de cartes ou arbres sémantiques de traits grammaticaux ou lexicaux, etc.

Les types dégagés constituent des critères de classification des langues, qui ne sont dus ni à des liens génétiques, ni à des faits historiques, ni à des faits aréaux (de contact), mais qui relèvent davantage de phénomènes cognitifs généraux exprimés à travers la diversité des langues, et de la manière dont le cerveau humain traite et organise l'information. Des travaux récents partent du constat que les universaux du langage sont peu nombreux, et voient au contraire la diversité linguistique comme le point crucial pour les sciences cognitives. Un dialogue fructueux peut alors s'engager avec certains champs de recherche en biologie, centrés sur la problématique de la diversité et de la variation.

Pour avoir une certaine validité, ces recherches sont menées extensivement sur un grand nombre de langues typologiquement différentes ; elles s'articulent à de grandes bases de données dont le traitement relève de la typologie quantitative.

Des recherches actuelles tentent également de dégager des universaux sémantiques statistiques et un cœur de notions communes à toutes les langues, concernant par exemple la

terminologie des parties du corps, des émotions, etc.

Depuis une vingtaine d'années, des chercheurs français se sont engagés dans la typologie et la quête d'invariants du langage. Ces recherches ont pris un essor important ces dix dernières années grâce à la création de la fédération T.U.L, qui a été le catalyseur de très nombreuses recherches conduites dans des approches théoriques différentes. Les recherches menées au sein de la Fédération T.U.L ont un triple but :

(i) la définition des propriétés communes aux langues (universaux) et des contraintes générales auxquelles elles sont soumises à tous les niveaux structurels, que ces contraintes résultent de leur architecture interne ou de contraintes cognitives générales ;

(ii) articuler ces recherches à l'analyse de la variation inter-langues et de la diversité linguistique, afin de dégager les mécanismes internes et externes d'évolution des systèmes, et leur modélisation ;

(iii) élaborer des bases de données linguistiques et typologiques, contribuer à l'archivage de textes de langues en danger ou peu documentées.

La fédération T.U.L a également favorisé de nombreux liens institutionnels internationaux, comme en témoignent l'organisation, pour la première fois en France, de la 7<sup>e</sup> édition de la conférence internationale de l'ALT (Association of Linguistic Typology) et celle d'une École d'été franco-allemande.

## 2.3 LINGUISTIQUE HISTORIQUE, CLASSIFICATION ET ÉVOLUTION DES LANGUES

L'étude des langues dans leur dimension historique, évolutive et leur classification en familles est un domaine fondamental de la linguistique.

Au cours des dernières années les linguistes ont continué à avancer dans le déchiffre-

ment et l'interprétation des langues littéraires éteintes (comme le méroïtique), la reconstruction des proto-langues, la compréhension de l'histoire des familles de langues, de leur structure interne comme de leurs parentés lointaines, et des contacts qui les ont influencées. L'évaluation de ces propositions se poursuit. Dans de nombreux domaines un certain scepticisme face aux propositions de parentés lointaines faites dans la période précédente semble prévaloir. Cependant la reconnaissance toute récente par de nombreux linguistes d'une parenté génétique entre une langue du vieux monde, le ket, parlé dans la vallée de l'Ienisseï, avec les langues athabasques du continent américain, est un événement particulièrement saillant.

Un renouveau méthodologique est en cours. L'utilisation des arguments typologiques dans la détermination des parentés linguistiques se répand. L'application des statistiques bayésiennes à la distribution des groupes de cognats dans les langues d'une famille ouvre des perspectives intéressantes pour l'élucidation de sa phylogénie, comme d'ailleurs d'autres méthodes importées des sciences de l'évolution telles que les méthodes de compatibilité appliquées au vocabulaire de base. D'autres travaux suggèrent que la longévité des mots est corrélée à leur fréquence d'emploi. L'étude systématique des changements sémantiques attestés aide à mieux saisir leur directionnalité, tout comme l'expérience accumulée par les études sur la grammaticalisation. La susceptibilité des mots à l'emprunt a fait l'objet d'études quantifiées dont les résultats pourraient conduire à la définition d'une liste de vocabulaire de base établie sur des bases explicites, à la différence des listes de type Swadesh.

Alors que l'idée d'un peuplement du monde par notre espèce au cours des derniers 150 000 ans semble maintenant largement acceptée, la capacité de linguistes à proposer des modèles de peuplement leur permet de participer aux discussions avec les généticiens des populations, archéologues, paléo-climatologues, etc. portant sur la période de formation des grandes familles de langues modernes au cours des 10 000 dernières années.

Enfin, les développements de nouvelles théories sur les contacts de langues, la constitution et l'évolution des pidgins et créoles, le changement linguistique, la grammaticalisation, les alternances codiques ont aussi contribué à une profonde évolution de la linguistique historique et comparative. Cette évolution se poursuit.

## **2.4 SOCIOLINGUISTIQUE, DIVERSITÉ DES PRATIQUES LANGAGIÈRES, VARIATION**

La diversité des langues et de leurs usages est au cœur de la discipline et demande une prise en compte, à côté de la diversité des systèmes linguistiques, de la variation des formes et des pratiques en contextes. C'est ainsi que les recherches relevant de la dialectologie, de la sociolinguistique, de l'anthropologie linguistique, de la linguistique interactionnelle contribuent à la documentation, description et modélisation de la diversité et de la variation au sein d'aires linguistiques, de groupes sociaux, de contextes d'activité. Les enjeux se situent aussi bien sur le terrain, en concernant la multiplicité des techniques d'enquête et de documentation – des questionnaires et des cartes aux recueils d'enregistrements en situation non contrainte par le chercheur – que du côté de la conceptualisation des phénomènes de variation, de changement, d'émergence, d'ajustement contextuel. Les corpus de données documentant les langues, leurs variétés et leurs usages en situations diversifiées doivent continuer à se développer afin de mettre à disposition des données «écologiques» en mesure de rendre compte des dynamiques des non-standards, des alternances de styles, des accommodations linguistiques – que ce soit dans des domaines aussi divers que, par exemple, les pratiques linguistiques dans des domaines d'expertise professionnelle, dans des groupes de jeunes, dans des communautés migrantes, dans les interactions médiées par les nouvelles technologies. Un domaine particu-

lièrement important est représenté par les situations de contact, caractérisées par des alternances codiques mais aussi des *lingua francae* hétérogènes et des mélanges de langue, produisant des variétés hybrides et émergentes. Ces hybrides linguistiques mettent à l'épreuve les modèles basés sur une conception homogène de la langue et invitent à de nouvelles conceptualisations. Cela met au cœur de l'étude de la diversité les processus de catégorisation à la fois des langues, des locuteurs, des contextes de parole et d'interaction, des activités et des relations mutuellement configurantes entre ces catégorisations et les conduites effectives des locuteurs.

## 2.5 TEXTES, DISCOURS ET INTERACTION

L'essor de la linguistique de corpus durant la période récente s'est traduit par la mise à disposition de vastes ressources et de systèmes d'annotation de plus en plus raffinés. Les données désormais accessibles ouvrent des perspectives nouvelles pour le développement des études sur les textes et les discours.

L'analyse de la textualité à proprement parler ouvre un champ original et en plein essor. Les modèles sont en partie contraints, et par la langue, et par des patrons de production, dont les genres sont un exemple largement reconnu mais encore mal exploré. Comprendre la mise en œuvre de cette complexité (tant au niveau de l'encodage que du décodage) et tenter de la modéliser conduit, là encore, à des collaborations étroites avec l'informatique, les mathématiques (statistiques et topologie) et la psychologie expérimentale. À ces travaux, viennent s'ajouter des études explorant les conditions historiques d'emploi de la langue, dans leur dimension à la fois textuelle et sociale. Ces études mettent l'accent soit sur l'interdiscours où s'entrecroisent des séries d'énoncés dont on peut étudier les récurrences et les déplacements, soit sur des pratiques discursives dont les fonctionnements ne

se ramènent pas seulement à des contraintes pragmatiques ou à des mécanismes rhétoriques universels, et dont il faut restituer les conditions historiques.

Le développement des recherches sur le texte et le discours doit être favorisé dans la mesure où les résultats acquis et attendus ont une incidence directe sur les travaux

- en linguistique générale et comparative, pour l'étude des phénomènes de grammaticalisation (les régularités pragmatiques que l'on observe en discours tendant, avec le temps, à devenir des contraintes syntaxiques) :

- en TAL, pour la hiérarchisation des informations et donc le filtrage, ou pour la segmentation thématique ;

- en psycholinguistique, pour le développement et l'évaluation d'hypothèses sur les processus de production et de compréhension afin de mieux comprendre l'acquisition des habiletés et compétences textuelles mais aussi les diverses pratiques de production.

Ce développement devrait être accompagné par la mise à disposition des unités de moyens en personnels et en équipements leur permettant de mettre en œuvre des études sur de très larges corpus (gros travail d'annotation et de traitement des données) et d'étoffer leurs forces en TAL et en psycholinguistique.

## 3 – LANGAGE ET COGNITION

### 3.1 PHILOSOPHIE DU LANGAGE

Les recherches en philosophie du langage ont des liens importants avec la sémantique, la pragmatique et les fondements de la linguistique théorique. Longtemps pratiquée presque exclusivement dans le monde anglo-saxon, la philosophie du langage est un domaine maintenant bien représenté et bien vivant en

France. Il y a des collaborations régulières entre les chercheurs de haut niveau américains et britanniques (venant notamment du MIT, de Yale, Harvard, Rutgers, UCLA, Oxford ou Cambridge) et plusieurs laboratoires du CNRS, grandes écoles et instituts de recherche français (INRIA, EHESS, ENS). La communauté des chercheurs travaillant sur le sens et l'interprétation tant du point de vue linguistique que logique ou philosophique s'est structurée ces dernières années autour du GDR de sémantique et a acquis une meilleure visibilité à la fois à l'échelle nationale et internationale, comme en témoigne l'organisation de conférences annuelles en France (comme SPE ou JSM). Les recherches en France sur les processus mentaux qui sous-tendent le traitement du langage (l'acquisition, la production, la perception et la compréhension) et les liens qui s'établissent dans ces processus entre langage et pensée en ont grandement profité.

## 3.2 PSYCHOLINGUISTIQUE

La psycholinguistique vise à comprendre les différents facteurs psychologiques et neurophysiologiques qui rendent l'être humain capable d'acquérir et d'utiliser le langage. Plus précisément, cette discipline cherche à décrire les processus mentaux qui sous-tendent la production et la compréhension du langage, du point de vue de l'acquisition et de l'utilisation experte. Ainsi, de nombreux psycholinguistes cherchent à définir la part de l'universel par rapport aux spécificités des langues, analysent les interactions entre le développement cognitif et le développement langagier, ou bien les interactions entre la conceptualisation d'un message à produire, et la formulation de ce message dans une langue donnée. On cherche aussi à mieux comprendre les origines psychologiques ou neuropsychologiques de différents dysfonctionnements (aphasies, dysphasies, etc.) ou retards d'acquisition (dyslexie, dysorthographe, illettrisme, etc.).

Comprendre comment l'être humain utilise le langage implique d'avoir recours à une

diversité d'approches et de disciplines : de la linguistique formelle à la linguistique de corpus, aux paradigmes de la psychologie expérimentale ainsi qu'aux méthodes d'imagerie utilisées dans les neurosciences cognitives. On voit bien ici la nécessaire interdisciplinarité des études sur le langage. Une interaction constante entre sciences du langage et psycholinguistique doit être maintenue. L'observation des productions linguistiques aussi « complètes » et « naturelles » soient-elles ne fournit, en effet, aucune indication sur les processus sous-jacents à la production et à la compréhension. En revanche, les expérimentations psycholinguistiques sont spécifiquement conçues pour pister ces processus, en particulier des indicateurs sur leur déroulement temporel et les structures cérébrales impliquées par ces traitements. De même, la psycholinguistique doit intégrer les apports de la linguistique pour comprendre comment les contraintes liées aux règles et aux structures du langage affectent les traitements de production et de compréhension.

Un exemple qui illustre cette interdisciplinarité est l'étude des langues des signes (LS). Les conditions d'accès des sourds à leurs langues offrent à la psycholinguistique et à la linguistique un ensemble de questionnements féconds. L'acquisition des LS fournit en effet, en soi, un contrepoint important parce qu'il s'agit de langues visuo-gestuelles, présentant de fortes particularités structurelles, voire typologiques (iconicité, multilinéarité, utilisation pertinente de l'espace). En termes développementaux, elles ré-interrogent notamment les liens entre cognition, imagerie mentale et conceptualisation et éclairent, au-delà des seules LS, la question des relations ontogénétiques entre langue et gestualité. Dans la mesure où ces langues sont exceptionnellement langues maternelles (95 % des enfants sourds naissent en milieu entendant), elles conduisent aussi à questionner la notion d'âge critique. Il en va de même de la problématique des modalités de l'accès à l'écrit de la langue vocale de personnes qui n'entendent pas, à même d'apporter un éclairage nouveau sur les processus cognitifs en jeu dans l'entrée dans l'écrit comme sur les processus d'acquisition d'une L2.

Constatant cela, il faut prendre acte du fait que, pour l'étude de certains phénomènes linguistiques, un nombre croissant d'unités de la section 34 vont demander à disposer de personnels et d'équipements permettant de conduire des investigations alliant des études sur corpus, des modélisations informatiques, et des études expérimentales.

## 4 – TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES LANGUES, OUTILS ET RESSOURCES

Les questions théoriques que se posent les linguistes se nourrissent de la confrontation avec les données authentiques, ce qui incite à la production de ressources linguistiques (bases de données, corpus, dictionnaires). Les sciences et technologies de l'information constituent, avec la cognition, l'autre grand domaine d'interface de la linguistique, sous le nom de traitement automatique des langues (TAL). De nombreux laboratoires d'informatique ont un rattachement secondaire à la section 34, et un certain nombre de chercheurs changent avec profit de section dans un sens ou dans l'autre. Le rôle du CNRS est aussi de recruter dans ce domaine les ingénieurs indispensables à ce type de recherches.

### 4.1 CONSTITUTION DE RESSOURCES LINGUISTIQUES

Les ressources langagières «brutes» (corpus de journaux ou de radio disponibles sur internet par exemple) sont des matériaux importants pour les linguistes. Mais elles sont insuffisantes quand il s'agit de mener des recherches un tant soit peu précises (Dans quels contextes trouve-t-on un sujet inversé?

Quels adjectifs épithètes précèdent le plus souvent le nom?). C'est pourquoi une part importante du travail des linguistes est constituée par la construction de véritables ressources linguistiques, à grande échelle et librement disponibles, aussi bien pour les chercheurs que pour le grand public. On peut citer ainsi, à titre d'exemple, la base textuelle Frantext ([www.atilf.fr/frantext](http://www.atilf.fr/frantext)), avec plus de 220 millions d'occurrences de mots, le TLFi ([www.tlfi.fr](http://www.tlfi.fr)) ainsi que le corpus arboré pour le français (*French treebank*), qui ont profondément modifié le travail sur la langue française.

La synthèse des connaissances grammaticales sur des langues variées, de façon systématique et indépendamment des cadres théoriques, est également un objectif à encourager. On a vu paraître ces dernières années d'excellentes grammaires de référence de plusieurs langues européennes comme l'anglais, le catalan, l'espagnol ou encore l'italien, mais pas pour le français. La réalisation en France, dans des laboratoires du CNRS, de grammaires de ce type, l'une pour le français contemporain, l'autre pour l'histoire du français, sont des projets de longue haleine, réunissant plusieurs dizaines de chercheurs français et étrangers, et à encourager. Une grammaire de référence est un ouvrage «visible» et dont la vie utile s'étend sur un nombre appréciable d'années. Elle engage donc aussi l'utilité sociale de la linguistique.

### 4.2 LEXICOGRAPHIE

La lexicographie est le mode d'exposition privilégié de la lexicologie : il s'agit essentiellement d'un langage. En tant que tel, elle vise à modéliser le lexique, la composante la moins aisément saisissable, d'un système linguistique, mettant à nu ses structures sémantiques, morphologiques, syntaxiques ou encore étymologiques.

Contrairement à la lexicographie commerciale, la lexicographie scientifique a appris à renoncer à la course à la nomenclature la plus ample au profit de la qualité de la

description. Plutôt que par tranches alphabétiques successives, la sélection de la nomenclature est établie sur une base variationnelle (états de langue du passé, vocabulaire marqué diatopiquement), étymologique (lexique héréditaire, emprunts à une langue donnée) ou thématique (vocabulaire d'un domaine notionnel). La description est réalisée à partir de données textuelles (bases de données, éditions de textes) ou orales (enquêtes de terrain), les exemples construits étant en principe proscrits. Les microstructures adoptées peuvent facilement dépasser la dizaine de niveaux d'analyse et la centaine de marqueurs descriptifs. De façon caractéristique, les produits lexicographiques de pointe peuvent aller jusqu'à se présenter comme des recueils d'articles de revue scientifique classés par ordre alphabétique.

Si la lexicographie constitue un secteur en plein essor, le défi de la recherche française dans ce domaine consiste en une homogénéisation des comportements de recherche et des pratiques d'exposition : l'excellence reste pour l'essentiel confinée aux grandes langues véhiculaires, aux variétés hautes, au lexique non construit, tandis que les langues vernaculaires rares, les variétés diasystématiques peu valorisées ou plus difficiles à appréhender, le lexique morphologiquement construit et les unités polylexicales représentent un terrain encore largement à conquérir. En outre, les principes microstructurels ambitieux tels que l'exigence d'une contextualisation ou celle de l'authenticité des exemples n'ont percé que récemment – et de façon très ponctuelle – dans le domaine de la lexicographie bi- et multilingue, qui mérite d'être développée dans le contexte actuel d'une mondialisation croissante.

L'informatisation des productions lexicographiques est à l'heure actuelle presque généralisée, ce qui permet de nouvelles formes de production, mais aussi d'exploitation : le dictionnaire devient un corpus, une ressource exploitable par des sous-disciplines linguistiques comme la morphologie constructionnelle, la microsyntaxe ou la sémantique lexicale, tout en ouvrant des perspectives particulièrement fécondes à la recherche en traitement automatique des langues. En 2005, le

CNRS s'est ainsi doté du CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, (<http://www.cnrtl.fr>), dont le Portail lexical permet la consultation croisée et l'exportation dans un format normalisé d'une multitude de lexiques et de dictionnaires.

### 4.3 LINGUISTIQUE DE CORPUS

La disponibilité de ressources textuelles électroniques de grande taille (corpus, bases de données textuelles, dictionnaires et lexiques) et les progrès de l'informatique ont permis au linguiste d'aller au-delà de l'accumulation de faits de langue et de confronter ses théories à l'usage effectif de la langue. C'est ce qu'on appelle la linguistique « de corpus », qui se développe depuis une quinzaine d'années en France et dans le monde.

La linguistique de corpus est confrontée à de nouveaux défis et de nouvelles complexités lors du traitement de corpus de langue orale et de langue en interaction. Ces défis sont multiples et traversent toutes les étapes de constitution et d'analyse des corpus oraux : arpentage du terrain en vue de recueillir des données représentatives et de qualité ; enregistrements audio et de plus en plus vidéo en vue de garantir une observabilité maximale des détails non seulement linguistiques mais aussi visuels et multimodaux de l'interaction ; anonymisation et protection de la vie privée des informateurs ; transcription et annotation et leurs standardisations ; mise au point de moteurs de recherche et d'étiquetages automatiques en mesure de traiter le caractère non standard de l'oral et de prendre en compte les dynamiques interactionnelles. Les avancées dans ce domaine permettent aujourd'hui d'envisager des banques de données de corpus qui documentent la langue parlée en milieu naturel, dans des interactions sociales situées dans une diversité de contextes, en tenant compte non seulement de la parole ainsi produite, mais aussi des conduites multimodales (regards, gestes, postures du corps, mouvements etc.). On citera par exemple le projet PFC (Phonologie du

Français Contemporain), la plate-forme CLAPI (Corpus de Langue Parlée en Interaction), spécialisée en corpus authentiques d'interactions, ou encore le Centre de Ressources pour la Description de l'Oral (<http://www.crdo.fr>), qui héberge de nombreuses ressources provenant de différents laboratoires. Ces données sont encore rares, et les corpus continuent à être de taille inférieure à ceux dont on dispose pour l'écrit – du fait de la difficulté de recueillir de la parole vive et du fait des coûts très élevés de transcription. Une priorité est donc de multiplier les corpus accessibles dans des formats standardisés et traitables par des outils informatiques. L'accès à de grandes masses de données orales et interactionnelles permet des descriptions et modélisations inédites de l'oral, ainsi que des dynamiques d'émergence et de changement de langue et de leurs variations dans des contextes d'usages spécifiques.

#### 4.4 ARCHIVAGE DES LANGUES

La constitution d'archives de corpus et de ressources linguistiques de première main, collectées par des spécialistes contribuent à deux grands domaines : d'une part, lorsqu'elles portent sur des langues minoritaires souvent peu décrites, voire inconnues, elles sont l'un des moyens essentiels permettant de documenter et de préserver des langues en danger et de préserver le patrimoine culturel qu'elles véhiculent. D'autre part, lorsqu'elles concernent le français dans ses variations, elles permettent d'alimenter le projet d'un corpus de référence national. Les deux Fédérations de linguistique se sont fortement engagées sur ces terrains, TUL pour les langues peu décrites, l'ILF pour les corpus de français.

Le développement d'archives linguistiques étiquetées ou annotées de corpus oraux et écrits est un secteur dont l'essor va croissant au niveau international. Ils constituent des bases de données qui enregistrent un état de langue donné et qui sont essentielles pour les recherches actuelles et futures.

Des avancées notables, avec la mise en ligne de nombreuses données de langues diverses, ont déjà eu lieu dans ce domaine avec la création des archives du LACITO (<http://lacito.vjf.cnrs.fr/archivage/presentation.htm>), maintenant également hébergées par le CRDO (<http://www.crdo.fr>). D'autres corpus sont en cours de constitution grâce notamment au soutien de projets ANR ou européens. La constitution d'archives et de corpus numériques doit être soutenue.

#### 4.5 TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES LANGUES

Si la linguistique informatique a connu un grand essor dans les années 1950, ce domaine bénéficie aujourd'hui des apports du traitement de la parole, de la recherche d'information, de l'acquisition de connaissances, des interactions homme-machine et de la traduction automatique relayée ensuite par le traitement automatique des langues.

L'appariement des requêtes et des documents des systèmes de recherche d'information sur internet nécessite des bases lexicales et grammaticales de grande taille, permettant de résoudre les ambiguïtés potentielles (par exemple les ontologies développées par les logiciens et les sémanticiens), mais aussi des bases de données plurilingues pour pouvoir traiter des documents dans de multiples langues. Le caractère plurilingue de l'internet nécessite un développement d'outils pour une variété de langues sans commune mesure avec les travaux précédents.

Les corpus constitués par les laboratoires de linguistique servent non seulement à tester des théories ou analyses linguistiques, mais sont aussi utilisés comme bancs d'essai pour des implémentations sur ordinateur, par exemple pour les analyseurs syntaxiques. Des campagnes de comparaison d'analyseurs syntaxiques (EASY), ainsi que de méthodes d'extraction d'informations ou de fouille de texte (MUC), se font régulièrement avec la par-

ticipation non seulement de chercheurs, mais aussi de partenaires industriels.

Ces corpus étiquetés ou annotés avec des informations linguistiques servent aussi comme bases de données pour l'acquisition automatique d'informations diverses (lexique, syntaxe, structure discursive) par des méthodes d'apprentissage. Ces méthodes s'avèrent très importantes pour les recherches sur le discours, où les approches symboliques sont encore beaucoup trop fragiles pour arriver à des analyses automatiques de textes en dehors de domaines restreints, et cela est encore plus vrai de l'oral. Depuis une dizaine d'années, les approches statistiques sont devenues l'axe principal des recherches en linguistique computationnelle.

Si les techniques d'analyse et de traduction automatiques de l'écrit, comme les systèmes de synthèse ou de reconnaissance de la parole, semblent bien maîtrisés, de nouveaux défis apparaissent continuellement, comme le dialogue homme-machine oral et sans interface, avec de multiples applications tels que l'enseignement, la conduite automobile ou la médecine.

D'une façon plus générale, la possibilité d'intégrer dans les systèmes de TAL la prise en compte de sources d'informations différentes (signal acoustique, structure lexicale, morpho-syntaxique, données mimo-gestuelles) ouvre le champ du traitement automatique à l'étude de la multimodalité.

## CONCLUSIONS

Comme de nombreuses sections de l'INSHS, la section 34 voit partir à la retraite un nombre croissant de chercheurs et d'ingénieurs et techniciens. En 2010 la section compte 160 chercheurs titulaires et 42 devraient quitter l'organisme d'ici 2014 (28 DR et 14 CR), soit un taux de 32%. Ces départs risquent si nous n'y prenons garde, d'obérer des pans entiers de nos

disciplines, en particulier dans les domaines où l'université hésite encore à s'engager. Il faudrait recruter au moins 10 chercheurs chaque année pour maintenir la présence de chercheurs à temps plein dans les unités, en particulier de jeunes chercheurs s'engageant tôt (au niveau CR2) sur des projets nécessitant un fort investissement en temps d'enquête, de saisie et d'analyse.

Ces recrutements devraient être accompagnés d'un accroissement significatif des postes d'ITAS affectés dans les unités. Durant la période récente, les standards méthodologiques couramment admis dans la discipline ont considérablement évolué, avec des exigences accrues dans la collecte et le traitement de données attestées ou provoquées (comportementales ou de neuro-imagerie) ce qui fait que la linguistique est d'ores et déjà une discipline « appareillée » et va tendre à le devenir de plus en plus. Cette évolution implique des tâches d'ingénierie de plus en plus lourdes (mise en place de plates-formes pour l'annotation de corpus, pour le traitement des données, pour le montage d'expérimentations et pour l'élaboration d'outils TAL. Les besoins en personnels (et en équipements) sont importants et conditionnent le développement des recherches actuelles et futures susceptibles de satisfaire aux nouvelles exigences méthodologiques requises pour franchir le cap des évaluations internationales.

Une concertation plus étroite entre le CNRS et les universités permettrait de mettre en place une formation en sciences du langage solidement ancrée sur un véritable cursus commun entraînant tout autant les étudiants à la linguistique générale qu'aux enquêtes de terrain ainsi qu'aux ressources (TAL, statistiques...) et aux démarches expérimentales. Ces liens étroits pourraient aussi se manifester par un accroissement significatif des délégations, et par l'offre de post-docs ou bourses d'études permettant de développer des cursus multidisciplinaires.

Section à caractère interdisciplinaire, la section 34 entretient des liens étroits avec la CID 44, mais beaucoup moins avec la CID 42. Cette différence se marque tant par l'absence de

représentant de la section 34 auprès de la CID 42 que par une remarquable convergence dans la sélection des doubles candidatures entre les sections 34 et 44, qui n'existe pas entre les sections 34 et 42. Dans ces conditions, la section 34 s'interroge sur le sens de sa présence au sein des sections concernées par la CID 42.

Les sciences du langage sont une des composantes essentielles des sciences humaines auxquelles elles participent par leurs analyses spécifiques, par leurs interfaces avec d'autres disciplines et par leurs applications. Dans la structuration en cours à l'échelle des régions voulue par le CNRS, dès lors que les MSHS pourraient devenir l'instance de structuration de la recherche en Sciences Humaines et Sociales, il est indispensable que les sciences du langage y trouvent leur place, non seulement les UMR qui n'y sont pas toutes intégrées mais aussi les laboratoires, les équipes ou les programmes qui se sont signalés par la qualité de leurs travaux. C'est en effet en unissant les forces des UMR et des équipes universitaires que les sciences du langage gagneront en qualité et en visibilité.

Rappelons également que deux fédérations (ILF et TUL) regroupent la majorité des laboratoires qui relèvent de la section 34. Ces

deux fédérations jouent chacune dans leur domaine un rôle essentiel de cohésion, d'échange et de prospective. Leur réactivité en fait une interface performante entre les unités et la direction scientifique, comme avec le Comité national. Leurs missions doivent donc être maintenues. Toutefois, dans la mesure où les unités de recherche regroupent très souvent des chercheurs qui partagent des thématiques avec l'une ou l'autre fédération, la question de l'appartenance exclusive des laboratoires à une seule fédération, qui est actuellement la règle, mérite d'être posée, comme mérite d'être posée la question de l'ouverture des fédérations à des chercheurs qui conduisent leurs travaux dans d'autres cadres que les UMR.

Conscients d'être des acteurs sociaux de plein droit, les linguistes dérogeraient à leur mission s'ils ne menaient pas également une réflexion sur leur rôle au sein de la société et de la cité. Dans cette perspective, il n'est pas inutile de rappeler que les connaissances produites par les sciences du langage ont des applications dans divers domaines : en réponse aux besoins de politique linguistique, dans l'enseignement et l'ingénierie des langues, dans le traitement des pathologies de la voix, du langage ou de la perception auditive.

## ANNEXE 1

ANR	Agence Nationale de la Recherche	INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
EHESS	École des Hautes Études en Sciences Sociales	INS2I	Institut des sciences informatiques et de leurs interactions
ENS	École Normale Supérieure	INSHS	Institut National des Sciences Humaines et Sociales
ERC	European Research Council	JSM	Journées de Sémantique et Modélisation
GDR	Groupeement De Recherche	MIT	Massachusetts Institute of Technology
ILF	Institut de Linguistique Française (FR2393)		

PICS	Projet International de Coopération Scientifique	TUL	Fédération de recherche en Typologie et Universaux Linguistiques (FR2559)
SPE	Semantics and Philosophy in Europe	UCLA	University of California, Los Angeles
TAL	Traitement Automatique des Langues	UMR	Unité Mixte de Recherche

## PHILOSOPHIE, HISTOIRE DE LA PENSÉE, SCIENCES DES TEXTES, THÉORIE ET HISTOIRE DES LITTÉRATURES ET DES ARTS

*Présidente*

Barbara CASSIN

*Membres de la section*

Sophie BASCH

Marc BUHOT DE LAUNAY

Jacqueline CERQUIGLINI-TOULET

Aurele CRASSON

Mireille DELBRACCIO

Jérôme DOKIC

Michel ESPAGNE

Marie GAILLE

Laurence GIAVARINI

Gerhard HEINZMANN

Pierre-François MOREAU

Jacques MORIZOT

Sarga MOUSSA

Lise QUEFFELEC-DUMASY

Marwan RASHED

Anne-Lise REY

Jean-Pierre SCHANDELER

Anne SELLIER

Isidora STOJANOVIC

La section 35 réunit à l'heure actuelle 200 chercheurs, répartis au sein de 49 unités. Elle accueille un ensemble de recherches relevant de plusieurs champs disciplinaires. Son intitulé, *Philosophie, histoire de la pensée, sciences des textes, théorie et histoire des littératures et des arts*, donne une première idée de sa diversité. Il met en évidence la caractéristique la plus originale de la section : s'appuyer sur la découverte et l'exploitation de ressources patrimoniales, via notamment l'invention d'outils éditoriaux, pour explorer de nouvelles thématiques et de nouveaux domaines, éclairer les enjeux du présent, proposer en meilleure connaissance de cause des diagnostics, des prises de risque et des innovations, et répondre ainsi à ce qu'il est convenu d'appeler les grands enjeux sociétaux.

La section recèle en son sein des recherches pratiquement inexistantes dans les universités (une bonne part de l'édition musicale, des recherches relatives aux mathématiques chinoises, aux sciences arabes, à l'histoire des transmissions religieuses, etc.), mais l'ensemble ne prend sens que comme ensemble justement, par la manière dont les disciplines et les savoirs les plus pointus interagissent en se focalisant sur des objets et des projets communs. Cette diversité disciplinaire correspond au sein d'une seule section à l'un des atouts

majeurs de l'organisme CNRS en sciences humaines et sociales, et le présent rapport souhaite en montrer tout l'intérêt.

L'actualité des dernières années a été particulièrement dense pour la recherche. Le contexte général, à savoir la succession des réformes de fond (création de l'ANR, de l'AE-RES, des Instituts), la remise à plat des rapports avec les universités et les autres organismes devenus autonomes («umérisation/ désuémérisation», chaires d'excellence), l'empilement peu lisible des nouvelles structures (PRES, alliances, réseaux thématiques de recherche avancée, campus d'excellence, outils d'excellence, initiatives d'excellence, laboratoires d'excellence), le choix fait au plus haut niveau d'une recherche sur projets courts aux dépens d'une recherche fondamentale, sans parler d'une certaine méfiance, voire un certain mépris, de la gouvernance à l'égard de la communauté des chercheurs, n'ont pas été sans incidence sur la façon même d'envisager la recherche et le cours même de celle-ci.

Au-delà de cet infléchissement global des structures et du sens des missions dévolues à la recherche, la section 35 se trouve confrontée à des enjeux qui lui sont propres. On peut distinguer entre les enjeux internes à l'évolution de la section et les enjeux liés à la politique générale de réforme de la recherche. On examinera successivement les premiers puis les seconds, après avoir présenté la section 35 dans ses principales caractéristiques.

## **1 – COMPOSITION, AXES ET PÔLES DE RECHERCHE : L'INTERDISCIPLINARITÉ DE LA SECTION 35**

La section 35 recouvre des travaux en épistémologie, histoire et philosophie des sciences et des techniques, en philosophie du langage et de la cognition, en philosophie

antique, médiévale, moderne et contemporaine, en littératures française et d'expression française, en littératures étrangères, en théorie de la représentation littéraire et artistique, en esthétique et en musicologie.

La diversité des champs disciplinaires réunis dans la section constitue un gage de richesse, d'abord parce que cette diversité n'est pas synonyme d'éclatement : les échanges d'une discipline à une autre, les emprunts, les discussions méthodologiques et épistémologiques abondent depuis toujours ; les chercheurs partagent, pour la plupart, le point commun d'élaborer leur recherche à partir d'une confrontation rigoureuse et exigeante avec un *corpus* – point commun qui induit des questionnements croisés et des transferts méthodologiques d'une recherche à une autre. L'interaction des disciplines et des champs de recherche propres à la section 35 représente sans doute l'une des formes les plus complexes et les plus créatrices de rencontre disciplinaire dans le cadre des sciences humaines et sociales au sein de l'INSHS, d'autant que cette pluridisciplinarité agit non seulement au niveau de la section mais caractérise aussi un bon nombre des laboratoires qui la composent. La section 35 a réussi, au cours des dernières années, à tirer un bénéfice scientifique de la pluralité des disciplines qu'elle réunit : elle peut se définir non comme une juxtaposition d'approches disciplinaires, mais plutôt comme un lieu de confrontation et de réflexion au sujet de problèmes et de questions qui structurent les sciences humaines dans leur ensemble. À titre d'exemple, on peut évoquer la tension féconde entre histoire et épistémologie des sciences, la question de la définition et de la frontière de la littérature, celle d'une actualisation de l'Antiquité, notamment des rhétoriques antiques, celle, toujours renaissante, d'un néo-humanisme, ou encore la question de la dynamique des rencontres de cultures, le conflit entre traduction et authenticité, le problème de la production et de la transmission des savoirs fixés dans des textes.

La section 35 se spécialise dans l'étude des cultures écrites, de leurs imbrications, de leurs interactions, de leurs traductions. Dans

cet ensemble particulièrement large, elle assure, d'une part, une veille scientifique et privilège, d'autre part, les méthodes nouvelles, susceptibles d'aider à repenser ou à réorganiser intellectuellement les domaines qu'elle couvre. Les tensions qui la structurent, de la philologie aux sciences cognitives, en font donc un lieu d'interrogation sur la pertinence des cloisonnements disciplinaires et des identités scientifiques

(VOIR ANNEXE 1 : COMPOSITION DE LA SECTION)

## **2 – SPÉCIFICITÉ DE L'INTERDISCIPLINARITÉ DE LA SECTION 35 AU SEIN DU CNRS**

Plutôt qu'une liste des recherches domaine par domaine, nous voulons dégager ici quelques exemples significatifs d'objets communs produits au croisement des laboratoires par l'ouverture des perspectives disciplinaires, et qui constituent autant d'objets nouveaux dont la section aimerait favoriser le développement.

### **2.1 TRADUCTIBILITÉ – TRADUCTIONS, TRADITIONS, TRANSFERTS, MÉTISSAGES, REPRÉSENTATIONS**

Le point focal d'une grande partie de ces disciplines et sous-disciplines est une pratique des textes, au sens le plus large du terme (des mathématiques à la musique, et de la philosophie présocratique aux correspondances), qu'il s'agisse de les « inventer », de les répertorier, de les « critiquer » (établissement, étude génétique, édition, commentaire, interpréta-

tion), de les mettre à disposition (corpus), de les traduire, d'étudier leur histoire, les conditions de leur production, de leur transfert ou de leur réception. Conjuguant synchronie et diachronie, la recherche en section 35 ajoute aux réflexions actuelles sur la nature des savoirs littéraires, philosophiques ou scientifiques, une profondeur d'enquêtes qui traverse les périodes – l'Antiquité grecque, le Moyen-Âge arabe ou latin, la Renaissance, l'âge classique, les Lumières, l'époque romantique, jusqu'à la culture contemporaine – et les frontières – mondes gréco-latin, judéo-chrétien, arabe, indien, africains, extrême-orientaux, continent latino-américain, cultures anatoliennes, germaniques, slaves, etc.

L'un des objets transversaux le plus marquant et le plus riche d'avenir dans cette perspective peut être désigné par « traductibilité », en entendant par là non seulement la traduction interlinguistique des textes et des mots, mais la réflexion sur le caractère universel ou singulier des concepts et des théories, la question de la tradition, de la transmission, des transferts, des croisements et des appropriations au sein d'une aire culturelle et d'une culture à une autre, donc les articulations entre langues, pensées, cultures et représentations.

On peut facilement montrer, en croisant une approche chronologique et les dominantes disciplinaires, en quoi tous, ou presque tous, les laboratoires de la section ont approprié ce type de questionnement à leurs choix d'objets. Ainsi, l'IRHT n'est pas seulement un institut où l'on travaille sur le Moyen-Âge mais un des rares centres au monde ayant vocation à préserver dans son intégralité la mémoire écrite du monde médiéval et de la Renaissance en au moins six langues. Le Laboratoire d'Etudes sur les Monothéismes (UMR 8584) est, en France, le seul à étudier de manière historique, non-confessionnelle, le fait religieux dans les trois traditions monothéistes (sans exclure le monothéisme philosophique païen), de l'Antiquité à l'époque moderne ; il examine la confrontation entre les rationalités religieuses et la rationalité philosophique, et s'appuie sur l'étude de traditions textuelles qui vont du latin et du grec jusqu'aux langues modernes (allemand), en

passant par l'hébreu, le syriaque et l'arabe. Le centre Léon Robin interroge le sens et les conditions du passage du corpus des Présocratiques grecs à celui encore inexploré des Présocratiques latins, et propose via le *Dictionnaire des intraduisibles* et ses traductions une réflexion d'ensemble sur ce que peut vouloir dire « philosopher en langues ». La question des « transferts culturels » est au cœur de la problématique du laboratoire « Pays germaniques, histoire, culture, philosophie » etc. L'UMR 8599 (Centre d'étude de la langue et de la littérature françaises des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles) complète cet ensemble. Elle unit les recherches sur les deux périodes qui viennent d'être mentionnées, l'âge classique et le siècle des Lumières et mène une politique active d'édition critique (notamment les œuvres complètes de Molière, Diderot, Mercier, les Contes de fées des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, sans compter une forte participation à l'édition Voltaire d'Oxford) qui est couplée avec une réflexion sur la nature et le statut des textes (naturalisation, transmission, réception, appropriation).

La traduction, l'édition, l'interprétation de la pensée antique – latine, grecque, arabe notamment – constituent un point fort manifeste. L'UMR8131 (Centre Léon Robin de recherche sur la pensée antique), l'UPR76 (Centre Jean Pépin) et l'UMR8163 (Savoirs, Textes, Langues) en sont les acteurs principaux, sans oublier la FR33 (Institut des traditions textuelles – philosophie, sciences, histoire et religions) et l'UPR841 (Institut de recherche et d'histoire des textes). Du point de vue disciplinaire, la philosophie s'y trouve particulièrement bien représentée. Mais dans tous les cas, ces unités sont des lieux de confrontation pluridisciplinaire, tant du point de vue méthodologique qu'épistémologique : philosophie / linguistique, philosophie / littérature, philosophie / grammaire, philosophie / philologie, philosophie / histoire, philosophie des sciences / histoire des sciences, etc.

Un second pôle est centré autour de la Renaissance qui, comme le précédent, réunit plusieurs compétences. Mise à disposition des ressources documentaires, traduction, édition, interprétation sont les activités principales de

plusieurs laboratoires : le GDR2837 (Culture latine de la Renaissance européenne), le GDR3063 (Théories du poétique) (« Théories du poétique »), qui travaille à l'interface de l'italien, de l'espagnol/catalan, de la langue d'oc et bien sûr du latin, l'UMR6576 (Centre d'études supérieures de la Renaissance) déploient leurs recherches dans ce champ particulièrement riche, tandis que d'autres unités y consacrent une partie de leurs travaux, par exemple l'UPR76, l'UMR5037 (Institut d'histoire de la pensée classique), ou l'UMR5186 (Institut de recherche sur la Renaissance, l'Âge classique et les Lumières). L'objet « Renaissance » est ainsi, au croisement de ces laboratoires, un objet textuel et plurilingue, non moins littéraire et philosophique que mathématique, technique, pictural, architectural et musical.

Entre la période antique et la Renaissance, il faut souligner l'importance des travaux sur le Moyen Âge mené au sein du CNRS par des unités relevant de la section 35, qui compense autant que faire se peut (de concert avec la section des Sciences religieuses de l'EPHE) la négligence dans laquelle cette période est si souvent tenue à l'Université. Les unités citées précédemment, au sujet de la période antique et de la Renaissance, accueillent également des travaux sur la pensée et le *corpus* du Moyen Âge, auxquelles il faut ajouter l'UMR6223 (Centre d'études supérieures de la civilisation médiévale), même si elle ne relève pas de la section 35 à titre principal, ainsi que le GDR3063 mentionné ci-dessus.

La période classique et moderne concentre des recherches philosophiques et littéraires, avec le travail d'édition et de traduction de l'UMR5037 et de l'UMR5186, déjà évoquées. Les recherches spécifiques sur les Lumières se déploient au sein du GDR2838, dont l'objet est l'édition critique des œuvres complètes de D'Alembert, et plus largement de l'UMR5611 (Littérature, idéologies, représentations aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles). L'UMR8599 (Centre d'étude de la langue et de la littérature françaises des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles) complète cet ensemble.

La section 35 accueille enfin un nombre significatif de recherches sur le XIX<sup>e</sup> siècle ainsi

que sur la période la plus contemporaine, à nouveau tant littéraires que philosophiques. De façon transversale, la question de la transmission et des transferts ainsi que celle de l'émergence des connaissances et des théories mobilisent les recherches de plusieurs équipes qui, par ailleurs, peuvent travailler sur des objets ou des aires culturelles très différents. On peut évoquer par exemple l'UMR3199 (Transitions), l'UMR8547 (Pays germaniques, histoire, culture, philosophie -Transferts culturels/Archives Husserl de Paris) ou encore l'UMR8131 (Centre de recherches interdisciplinaires sur l'Allemagne) qui relève de la section 35 à titre secondaire. Des perspectives comparatistes sont développées, pour l'étude des *corpus* et celle des méthodes, par exemple dans le programme « Les écritures de l'intime et l'autofiction en France et en Russie au XVIII<sup>e</sup> et au XIX<sup>e</sup> siècle » de l'UMR6563 (Centre d'étude des correspondances et journaux intimes des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles). Pour cette période comme pour les autres, les unités de recherche relevant de la section 35 déploient un effort significatif dans le domaine de l'archivage, de l'édition de textes et du travail sur manuscrit : l'UMR8132 (Institut des Textes et Manuscrits Modernes) en constitue une illustration exemplaire, tout comme l'UMR6563 déjà évoquée.

L'effort de théorisation, le plus souvent inscrit dans une réflexion plus large relevant de l'esthétique et de la théorie des représentations, également attentive aux supports et médias de l'expression artistique, littéraire ou philosophique, est au centre des programmes de recherche développés au sein de la FRE3307 (Institut d'esthétique, des arts et technologies), du GDR3063, de l'UMR7172 (Atelier de Recherche sur l'Intermédialité et les Arts du Spectacle), ou encore l'UMR8566 (Centre de recherche sur les arts et le langage). Dans le domaine de la musicologie *stricto sensu*, on soulignera le rôle de deux UMR qui relèvent de la section 35 : l'UMR 200 (Institut de recherche sur le patrimoine musical en France), l'UMR2162 (Atelier d'études et de recherches du centre de musique baroque de Versailles), sans négliger des recherches qui se développent dans des unités dont ce n'est pas la vocation principale : par exemple, l'UMR6576

(Centre d'études supérieures de la Renaissance) ou l'UMR8566 (Centre de recherche sur les arts et le langage). Pour ce domaine, il faut citer encore l'UMR9912 (Sciences et Technologies de la Musique et du Son), même si elle ne relève pas de la section 35 à titre principal.

Il faut compléter ce tableau par une description de la recherche en philosophie et histoire des sciences, massivement présente au sein de la section 35. Toutes périodes confondues, elle constitue un axe propre de la section, présent dans toutes les périodes évoquées précédemment et selon différentes perspectives de problématisation. L'éventail en est très riche, d'une approche historique à une perspective naturaliste. De ce fait, cet axe est un lieu de débats sans cesse renouvelés entre différentes traditions et orientations théoriques. L'UMR6059 (Centre d'épistémologie et ergologie comparatives), l'UMR7117 (Laboratoire d'Histoire des Sciences et de Philosophie), l'UMR7219 (Laboratoire de Philosophie et d'Histoire des sciences), l'UMR7656 (centre de recherche en épistémologie appliquée), l'UMR8590 (Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques), l'UMR8560 (Centre Alexandre Koyré-Centre de recherches en histoire des Sciences et des Techniques), l'UMR8129 (Institut Jean Nicod) en illustrent quelques unes des tendances fortes, aux côtés d'unités qui déploient partiellement leurs recherches en direction de l'histoire ou de la philosophie des sciences, telle que l'UMR5037 déjà citée.

Ces recherches sur la « traductibilité », que l'on n'inscrira pas de prime abord dans le champ de la philosophie politique et morale, sont évidemment lourdes d'enjeux politiques et éthiques. La problématique des transferts culturels comme celle de la traduction comportent des liens évidents avec l'analyse de l'État-nation, du nationalisme, du colonialisme et du post-colonialisme, de la mondialisation, du lien social dans les sociétés multiculturelles, etc. ; les recherches sur la constitution d'un espace confessionnel et les relations entre la langue des religions et celle de la cité débouchent sur des analyses cruciales quant à la distinction entre espace civil et espace confessionnel,

enjeu contemporain s'il en est. La convergence est massive avec la réflexion sur l'identité et les identités dans un contexte marqué par la migration de masse, les échanges transnationaux (Transitions, centre Marc Bloch, CERSES), les thématiques du multiculturalisme, de la minorité, de la circulation des savoirs et des cultures, le rapport des sociétés à l'histoire, à la mémoire et les phénomènes de « mémorialisation » (Transitions, Centre de recherches sociologiques et politiques Raymond Aron, CERSES). Plus généralement, il importe d'élaborer un savoir fiable – grâce à des études historiennes et archéologiques, mais aussi philologiques, grâce à des traductions et à des éditions de textes – sur les grandes traditions culturelles de l'histoire humaine, la façon dont les savoirs se transmettent de l'une à l'autre : un tel savoir a un impact direct sur la culture dont on prétend se réclamer et sur le monde commun que l'on entend construire (pour l'Occident : latin, gréco-latin, également pénétré d'un héritage arabe, judaïque, indien, etc.).

## **2.2 OBJETS ÉMERGENTS EN PHILOSOPHIE POLITIQUE ET MORALE CONTEMPORAINE : DE L'ÉCOSOPHIE À LA BIOÉTHIQUE**

La philosophie politique et morale contemporaine se déploie dans des questionnements eux aussi interdisciplinaires (entre sections, et parfois entre instituts), appuyés sur des socles de connaissances relevant de l'histoire de la pensée, qui portent :

– sur le rapport des hommes à la nature, aux animaux non humains et au vivant en général (notamment dans des unités qui ne relèvent pas de la 35 mais accueillent des philosophes, comme le CEFÉ ou le LAS). On assiste en ce moment à l'émergence d'une « écosophie »

– sur les relations des hommes entre eux en tant qu'êtres sociaux (qu'est-ce qu'une civilisation? Qu'est-ce qu'une culture? Comment

penser la civilité, la politesse? Qu'est-ce que la souffrance sociale? Qu'impliquent le mépris et la négligence et au contraire la reconnaissance ou la considération et le soin? (par exemple au CERSES, mais aussi dans des unités qui, sans relever de la section 35, accueillent des philosophes : l'UMR Triangle à Lyon, le CURAPP à Amiens, le GSPM)

– sur le rapport de l'homme à son corps, les libertés dont il dispose à son égard, l'inscription sociale du corps, l'expérience de la maladie et les institutions de santé (CERSES, IHPST ; GSPM). Les recherches de « bioéthique » se développent actuellement, selon différents registres, du plus normatif au plus critique, en lien avec un questionnement sur la relation à la philosophie des sciences, médicales et biologiques notamment.

– sur le pouvoir, son exercice, ses représentations, ses institutions et la conflictualité et les dynamiques sociales qui vont de pair avec lui (par exemple, au Centre de recherches politiques Raymond Aron ou au Centre Marc Bloch).

En général, ces axes de recherche sont élaborés et développés en lien indissociable avec :

– une interrogation épistémologique sur la démarche philosophique (analytique, historique, contextualiste, expérimentale, etc.) la plus appropriée à l'objet étudié

– le lien pluri ou inter-disciplinaire avec les autres sciences humaines et sociales ; dans certains cas avec les sciences de la nature (cf. les travaux sur la philosophie et la sociologie morales au CERSES ou sur la psychologie morale à l'Institut Jean Nicod et au CEEC)

– une réflexion sur les catégories de « normes », de « croyances », de « valeur », en lien avec la philosophie morale et le droit (CEECE, CERSES, GSPM).

Il serait purement et simplement aberrant de considérer que ces recherches, parce qu'elles ont pour objet des questionnements liés à l'époque contemporaine, s'effectuent sans lien, si polémique soit-il, avec le corpus philosophique et les théories morales et politiques parfois très anciennes. Tous les styles

philosophiques mobilisés par les questionnements contemporains peuvent se lire comme des prises de position méthodologiques et épistémologiques concernant le rapport aux questions, formes de pensée et catégories du passé : reprise, démarcation, rejet, reconstruction rationnelle à la Rawls, etc. Au-delà de ces enjeux méthodologiques et épistémologiques, on observe aisément comment le questionnement éthique et politique le plus contemporain s'élabore à partir de théories formant le corpus philosophiques traditionnel : pensée stoïcienne, aristotélisme, morale kantienne, utilitarisme benthamien, libéralisme millien structurent la réflexion bioéthique d'aujourd'hui.

Les unités spécifiquement dédiées à la philosophie politique et morale et relevant de la 35, à titre principal ou non, sont en petit nombre. On comptera surtout le CERSES et le Centre de recherches sociologiques et politiques Raymond Aron, auquel on pourra ajouter le centre Marc Bloch (une grande partie des recherches qui y sont menées relèvent de ces champs). Mais il faut remarquer aussitôt que des chercheurs relevant de la section 35 essaient dans des unités qui relèvent d'autres sections SHS, voire d'autres Instituts.

## 2.3 DE LA COGNITION COMME INTERFACE

Le préambule du site du CREA constitue un excellent point de départ pour considérer la question du positionnement des sciences cognitives au sein de la section 35. Il y est dit que les sciences cognitives tirent leur unité dans leur traitement commun des facultés cognitives : un tel traitement considère ces dernières comme « des processus reliés d'une part à des explications causales relevant d'une implémentation neuronale (neurosciences) et d'une incarnation corporelle (robotique) et d'autre part à des descriptions conceptuelles relevant de traditions philosophiques majeures concernant l'esprit, la conscience, l'intentionnalité et le sens.

On comprend que la philosophie – ou la formation philosophique – participe des sciences cognitives aux côtés d'autres disciplines – linguistique, psychologie, mathématique, sociologie, anthropologie, économie, etc. – et qu'elle s'intègre ainsi à la sphère des sciences cognitives. Cette « intégration » n'est pas pour autant synonyme d'une sortie hors de l'univers philosophique. Comme l'indique ce préambule, les sciences cognitives formulent des analyses qui relèvent de problématiques philosophiques on ne peut plus classiques – Qu'est-ce que l'esprit ? Qu'est-ce que la conscience ? Qu'est-ce que l'intentionnalité et le sens ? Elles peuvent être en désaccord avec des thèses formulées au sein de la philosophie, aujourd'hui ou par le passé ; mais elles en partagent pleinement les objets. C'est d'ailleurs ce que souligne encore sur le site du CREA la présentation spécifique des recherches qui y sont menées : « La spécificité du Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (...) est enfin de "revisiter" sur cette base les principaux problèmes fondationnels hérités des doctrines philosophiques de ce siècle (en particulier la phénoménologie). » (<http://www.crea.polytechnique.fr/LeCREA/>).

La présentation de l'Institut Jean-Nicod confirme cette perspective. En exergue du site, figure cette formule : « Un laboratoire interdisciplinaire à l'interface entre sciences humaines, sciences sociales et sciences cognitives ». Cette formule témoigne d'une rencontre entre plusieurs disciplines dans le traitement des questions ; mais elle renvoie aussi au fait que les sciences cognitives entendent renouveler l'approche d'objets qui ont structuré l'interrogation philosophique de manière pluri-séculaire, notamment dans le domaine de la philosophie de la connaissance. Concernant des thématiques aussi classiques pour la philosophie que l'esprit et le langage, l'institut propose des recherches qui convoquent trois disciplines principales, dont la philosophie du langage. La notion de « métacognition » qui désigne le second axe de recherche de l'Institut Jean-Nicod renvoie d'une part à l'idée de l'identité de soi et de la connaissance de soi – on se souviendra en passant du *leitmotiv* de Socrate – et d'autre part à celle d'une auto-

évaluation de soi, activité qui s'actualise dans des énoncés de genres divers tels que la croyance, la conviction, le jugement. Enfin, ce pan de recherche inclut l'examen de «sentiments épistémiques» qui ponctuent l'activité cognitive de façon prédictive ou rétroactive et en modulent l'orientation. Le troisième pan de recherche mis en avant par l'Institut Jean-Nicod étend les questions relatives aux actes cognitifs à l'espace social, par exemple pour interroger le comportement des agents économiques. (<http://www.institutnicod.org/>)

De façon générale, les sciences cognitives s'intéressent aussi aux dysfonctionnements des facultés cognitives, rejoignant ici des problématiques en grande partie prises en charge par la philosophie : au sein de la philosophie de la connaissance d'une part et de la philosophie comme médecine de l'âme d'autre part (depuis la constitution du corpus hippocratique et le partage alors opéré entre maladie du corps et maladie de l'âme, entre médecine et philosophie, jusqu'à l'émergence de la psychiatrie).

## 2.4 LES OBJETS NUMÉRIQUES

Les modalités de travail et les pratiques de numérisation sont en constante évolution dans notre section. Il faut faire une mention particulière des avancées de la musicologie. La plupart des musicologues travaillent sur le patrimoine, à savoir sur des corpus qui nécessitent prioritairement des compétences dans le domaine de l'archivage, du catalogage, de l'établissement de bases de données et de compétences historiographiques. Les périodes de recherches privilégiées s'échelonnent du Moyen Âge aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, hormis quelques incursions, plutôt rares et de très grande qualité, dans le moderne et le contemporain (XIX<sup>e</sup> XX<sup>e</sup> avec Debussy et XX<sup>e</sup> avec les écrits des compositeurs). La recherche musicologique française est ainsi internationalement reconnue comme innovante et performante en matière d'éditions, de corpus et de bases de données. Il faudra sans doute renforcer simultanément

les recherches dans le domaine des «théories musicales», par exemple, ou de l'interprétation philosophico-philologique des grands répertoires et des courants esthétiques.

(VOIR ANNEXE 2, LA FORCE ÉDITORIALE DE LA SECTION 35 : REVUES, COLLECTIONS, OUTILS ET CORPUS)

## 2.5 COMPARAISON AVEC LA PLURIDISCIPLINARITÉ À L'UNIVERSITÉ

La section 35 équivaut à plus de 10 sections du Conseil National des Universités (CNU).

Langues et littératures anciennes (section 8),  
Langue et littérature françaises (section 9),  
Littératures comparées (section 10),  
Langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes (section 11),  
Langues et littératures germaniques et scandinaves (section 12),  
Langues et littératures slaves (section 13),  
Langues et littératures romanes – espagnol, italien, portugais et autres langues romanes (section 14),  
Langues et littératures arabes, chinoises, japonaises, hébraïque et autres domaines linguistiques (section 15),  
Philosophie (section 17),  
Architectures (ses théories et ses pratiques, arts appliqués, arts plastiques, arts du spectacle, épistémologie des enseignements artistiques, esthétiques (section 18),

L'université, tout particulièrement en France, a ses propres contraintes liées aux enseignements et aux cursus qui constituent autant d'obstacles à l'interdisciplinarité. La section 35 bénéficie de par son positionnement même d'une transdisciplinarité naturelle. On a vu, en particulier, comment les «humanités» fonctionnent en son sein comme un «objet total» qui traverse les disciplines (philologie, génétique, philosophie, littérature, linguistique, anthropologie, histoire, droit, esthétique, fait religieux, musicologie, mathématiques, techniques), les périodes (de l'antiquité aux renaissances et aux appropriations modernes), les

espaces et les langues. Ce type d'appréhension des objets par la recherche irrigue l'enseignement, et les laboratoires du CNRS sont des lieux où se forme continûment le lien enseignement-recherche. Mais il est manifeste que l'enseignement (encore moins l'enseignement infléchi par la professionnalisation) ne saurait être la seule justification de la recherche. L'interaction et la complémentarité avec les universités sont donc l'une des préoccupations constantes de notre section.

L'orientation des universités vers un très petit nombre de pôles de recherche, vectorisés par des projets à court terme, court le risque de faire disparaître des disciplines entières. Après la loi sur l'autonomie des universités, les universités apparaissent placées au centre du dispositif, conduisant *de facto* les laboratoires du CNRS à s'inscrire dans un positionnement non seulement transversal, mais périphérique. Loin de s'en désoler, la section 35 choisit de revendiquer ce positionnement, s'appuyant sur le constat d'après lequel, dans les sciences humaines comme dans les sciences de la nature, transversalité et périphérie sont généralement un haut lieu de l'innovation. On pourra donner l'exemple de diverses orientations disciplinaires qui, aujourd'hui, occupent une place « centrale » de l'Université, mais qui ont d'abord été conçues et développées dans les unités de recherche relevant de la section 35. L'étude génétique des textes, la recherche sur la rhétorique ou les transferts culturels constituent des illustrations éloquentes de ce processus, dans lequel les laboratoires du CNRS jouent un rôle essentiel de création et de conception de références qui deviennent par la suite largement partagées. Il ne s'agit pas pour la section 35 de s'installer exclusivement dans un tel espace, mais d'insister sur sa fécondité et son importance, à côté du centre : la prise de risque qui permet de modifier les paradigmes scientifiques y est possible mieux que partout ailleurs.

## **3 – ENJEUX INTERNES À L'ÉVOLUTION DE LA SECTION 35 : RECRUTEMENTS, CARRIÈRES, ÉVALUATION, COMPLÉMENTARITÉS**

### **3.1 RECRUTEMENTS**

Le fait sans doute le plus massif est la très grande pression au recrutement subie par la section 35 dans toutes les disciplines et sous-disciplines qui relèvent de son concours. Tandis que la courbe démographique de la section indique sans ambiguïté la nécessité de renouveler le corps de ses chercheurs et de multiplier le nombre de postes ouverts au concours, ces derniers restent en très petit nombre. Aussi la section l'a-t-elle rappelé avec force dans deux motions suite au concours 2010 :

- de façon générale, en demandant une politique de rééquilibrage en faveur des humanités au sein du CNRS et de l'INSHS

- de façon spécifique, en soulignant que l'absence de postes de chargés de recherche de première classe et le petit nombre de postes de chargés de recherche de deuxième classe ouverts aux concours de 2009 et 2010 n'ont absolument pas permis de rendre justice à la qualité des candidats. Sur 180, une trentaine auraient immédiatement mérité leur place dans la recherche française ; seuls 4 d'entre eux ont été admis, conformément au nombre de postes proposés au concours.

La conjoncture actuelle induit des effets peu désirables : d'une part, les chercheurs recrutés sont plus âgés que par le passé, leur dossier étant de fait plus fourni que celui des candidats plus jeunes, dont l'excellence n'est pourtant pas en doute. D'autre part, la pratique du *fléchage* des postes, et à un moindre degré celle du *coloriage*, constituent, dans les conditions présentes, un élément supplémentaire de frustration pour le jury d'admissibilité : lorsque

moins de 5 postes sont ouverts au concours, et que 2 sont fléchés ou coloriés, il est impossible de donner toute leur place à des projets originaux et inventifs, mais qui ne correspondent pas aux profils recherchés.

Une proposition très concrète serait que les coloriages – qui doivent régulièrement être issus d'une concertation entre la direction scientifique et les sections, relais des directeurs d'unité – soient proposés pour deux ans, afin de permettre la constitution d'un vivier digne de ce nom.

La section 35 partage l'objectif premier de sa direction scientifique : un taux de remplacement de 1/1. Ces deux dernières années, le taux s'est élevé à 0,6 % pour l'INSHS dans son ensemble, ce qui est très éloigné du taux de 4 % de certaines sections relevant d'autres instituts du CNRS. Certains champs de la recherche fondamentale dans les disciplines couvertes par la section 35 vont ainsi, si l'on ne revient pas sur ces choix, très rapidement ; certaines unités se dépeuplent (ainsi l'UMR 8599). Ce taux vaut tout autant pour les ingénieurs (ainsi l'ITEM ou l'IRHT, qui sont absolument prioritaires).

## 3.2 CARRIÈRES

La récente et relative augmentation du nombre de postes de directeurs de recherche supprime un premier goulot d'étranglement et permet à ce niveau une relative harmonisation entre la carrière des chercheurs et celle des enseignants-chercheurs. Mais la section souligne qu'un second goulot d'étranglement subsiste lors du passage DR2-DR1, et que le nombre de DRCE est tout simplement ridicule, eu égard à la qualité des candidats et de leur production scientifique.

## 3.3 ÉVALUATION

Il importe de souligner que la promotion d'un rééquilibrage en faveur des humanités

n'est pas seulement une question de chiffres et de nombre de postes ouverts au recrutement. Elle touche aussi aux formes que prennent les travaux des chercheurs de la section, à leurs supports et à l'évaluation dont ils font l'objet. La réflexion menée au sein de la section 35 sur les critères pertinents d'évaluation et de recrutement recèle un débat spécifique sur l'interaction entre l'interrogation philosophique et les recherches scientifiques. En effet, la section est confrontée à une injonction récurrente, celle de proposer des évaluations biennales ou quadriennales et de proposer des promotions (au rang de directeur de recherche notamment) à partir de travaux présentés exclusivement sur un support électronique. Or, les chercheurs évalués par cette section devraient l'être à partir de l'ensemble de leurs travaux, dont la thèse et les ouvrages constituent la part essentielle, qu'on imagine difficilement lire en format électronique. Quelques articles mis en ligne ne suffisent pas à prendre une connaissance correcte de ce type de dossier.

Ce problème se double d'un effet pervers : certains chercheurs font parvenir à la section leurs travaux sur support papier (ouvrage, article, numéro de revue), à leur libre initiative ; mais la commission ne peut les prendre en compte, afin de traiter équitablement tous les candidats, alors qu'elle aurait précisément besoin de prendre connaissance de ces documents pour évaluer les chercheurs de façon informée. Aussi la section réitère-t-elle avec insistance le vœu, exprimé dans une motion votée à l'unanimité lors de sa session de printemps 2009, qu'à l'avenir *« les membres de la commission puissent prendre connaissance d'éléments représentatifs des productions des chercheurs à évaluer. De façon spécifique, en complément à leur dossier électronique, la section souhaiterait que ceux-ci puissent transmettre ouvrages et productions les plus significatifs (5 maximum) et que ces travaux soient envoyés aux deux rapporteurs à l'adresse de leur choix »*.

Cette demande est d'autant plus légitime qu'elle permet la nécessaire harmonisation avec les pratiques du CNU, qui vient d'obtenir que les dossiers support papier soient exigibles

et transmis dans nos disciplines (article 19 de l'arrêté du 19 mars 2010 fixant les modalités de fonctionnement du conseil national des universités, JORF n° 0075 du 30 mars 2010).

Plus généralement, les spécificités de l'évaluation propres à la section 35 doivent pouvoir être reconnues sans que la section soit constamment encouragée à adopter le modèle des sciences exactes et des sciences de la vie, caractérisé par l'importance de l'« *impact factor* » et autres indicateurs quantitatifs, la constitution de listes hiérarchisées de lieux de publication (par exemple de revues), le privilège conféré à l'usage de l'anglais comme seule langue de communication scientifique et la préférence donnée à la forme de l'article plutôt qu'à celle de l'ouvrage. Une évaluation de ce type est évidemment inadaptée à la plupart des travaux et des parcours des chercheurs évalués par la section 35 qui, pour autant, envisage les dossiers à partir de critères précis et circonstanciés. Outre le nombre et la qualité des publications (livres individuels, articles de recherche, éditions et traductions de texte, ouvrages collectifs), elle s'efforce d'apprécier l'originalité et le caractère novateur de la recherche, autrement dit la « prise de risque » qu'elle recèle, pour adopter un vocabulaire aujourd'hui courant, le rayonnement international d'un chercheur (mais pas seulement dans le monde anglo-saxon), notamment à travers la traduction de ses ouvrages en langue étrangère et ses séjours de recherche ou d'enseignement à l'étranger, son implication dans l'enseignement et la transmission de sa recherche (nombre de doctorants, de thèses soutenues, de post-doctorants et d'enseignants-chercheurs étrangers accueillis), sa contribution à la valorisation de sa recherche et du domaine dont elle relève, enfin sa participation à l'organisation même de la recherche. La section a la certitude que, dans tous les domaines qui sont les siens, la qualité ne saurait être une propriété émergente de la quantité.

### 3.4 COMPLÉMENTARITÉS ET ÉPISTÉMOLOGIE DU DISSENSUS

La discussion relative aux critères de l'évaluation et aux supports sur lesquels elle est susceptible de prendre appui est un bon révélateur pour appréhender un enjeu de la section relatif à la diversité de sa composition. Le précédent rapport mentionnait déjà des difficultés spécifiques qui restent d'actualité. Le nombre de postes accordés aux candidats spécialistes en sciences cognitives et les méthodes d'évaluation de la section 35 considérées du point de vue de ces sciences ont récemment fait l'objet d'un débat nourri. Les deux points, souvent confondus dans la discussion, doivent être distingués.

D'une part, certains ont affirmé que le classement proposé par le jury d'admissibilité ces dernières années n'a pas fait suffisamment de place aux recherches en sciences cognitives. Les chiffres mettent en doute une telle affirmation. En 2010, 4 postes de chargé de recherche de deuxième classe étaient proposés au concours, dont un sur un profil coloré sans rapport avec les sciences cognitives. Ce poste a été pourvu, tandis que les trois autres ont été attribués à un candidat littéraire et à deux candidats de formation philosophique, l'un philosophe de sciences, l'autre spécialiste de philosophie médiévale. En 2009, sur les deux postes offerts au concours de chargé de recherche de deuxième classe, le candidat classé 1<sup>er</sup> par le jury d'admissibilité (et maintenu comme tel par le jury d'admission) était en revanche un spécialiste des sciences cognitives. Compte tenu du faible nombre de postes offerts au recrutement et de la diversité des disciplines réunies dans la section 35, il ne semble pas qu'un recrutement sur six en deux ans relève de l'injustice la plus flagrante. Notons qu'aucun musicologue n'est entré ces deux dernières années au CNRS à ce grade. De façon plus générale, nombre de domaines philosophiques ou littéraires n'ont pas non plus été couverts par les recrutements de ces deux dernières années, par exemple l'histoire des sciences. Enfin, si l'on adopte un regard exté-

rieur à la seule section 35, on remarquera que les sciences cognitives peuvent également recruter leurs chercheurs dans d'autres sections, la section 34 et la CID 44, possibilité que d'autres spécialités n'ont pas.

Au delà de la question du recrutement, les spécialistes en sciences cognitives se singularisent au sein de la section 35 par le privilège qu'ils tendent à conférer, dans l'évaluation, aux publications sous forme d'article, dans des revues internationales et classées. En outre, certains styles ou manières de faire de la philosophie, notamment l'histoire de la philosophie, ne leur semblent pas toujours recevables. Cette discussion s'inscrit dans le débat philosophique international depuis une vingtaine d'années. En France, c'est au CNRS qu'elle se mène, à l'intérieur des unités de recherche de la section 35.

Deux attitudes semblent se faire jour dans la discussion relative à la place des sciences cognitives au sein de la section 35. Percevant leurs objets de recherche et leurs critères d'évaluation comme incompatibles ou étrangers à ceux de la section 35, certains estiment que les sciences cognitives devraient être pourvues d'une section à part entière, le cas échéant inter-instituts. Elle couvrirait un vaste domaine allant des neurosciences intégratives à la philosophie de l'esprit, en interaction avec l'épistémologie et la philosophie des sciences. D'autres considèrent que le fonctionnement d'un véritable atelier de pluridisciplinarité – comme l'est la section 35 – peut occasionnellement créer des difficultés d'évaluation, mais que ces dernières sont surmontées *dès lors* qu'une égalité de principe des formes de savoir, des méthodes et des épistémologies, des orientations thématiques, et des critères d'évaluation est acceptée par tous les membres de la commission. Ils estiment également que les objets des sciences cognitives renvoient souvent à des questions anciennes transformées et modulées par des données scientifiques nouvelles. Dans cette perspective, les tensions théoriques, plutôt que d'être appréhendées comme des signes d'incompatibilité, sont sources de débats constitutifs de l'intérêt et de l'originalité de la section 35. Elles permet-

tent une réflexion épistémologique sur l'articulation entre science et philosophie, et entre philosophie analytique et philosophie continentale ou herméneutique, caractéristique de la recherche française, voire de la *French theory*, dans ce qu'elle a de plus novateur et de mieux apprécié au sein du paysage mondial. C'est donc pour des raisons tant pratiques que théoriques que dans sa majorité la section 35 ne souhaite pas voir ses frontières redéfinies.

## **4 – LA SECTION 35 FACE À LA POLITIQUE GÉNÉRALE DE LA RECHERCHE : QUATRE « IMPÉRATIFS » EN QUÊTE DE SENS**

### **4.1 RÉFORME ET IMPÉRATIF D'« ADAPTATION » AU NOUVEAU PAYSAGE DE LA RECHERCHE**

Plusieurs aspects doivent être abordés dans cette rubrique, qui sont autant d'enjeux pour la section, présents et à venir.

#### **La section 35 et les universités**

Au regard des relations entre le CNRS et les universités, la section 35 a résolument choisi de ne pas jouer une institution contre une autre. Elle a pris l'initiative d'ouvrir, dès l'automne 2009, une réflexion concertée avec les partenaires universitaires afin de penser ensemble les lignes directrices et les moyens d'action des chercheurs et enseignants-chercheurs dans un paysage de la recherche profondément bouleversé. Les deux finalités affichées par le ministère, avec lesquelles nous ne saurions être en désaccord, sont : les économies d'échelle, la visibilité internatio-

nale. L'alliance et la coordination du CNRS et des universités consiste d'abord, pour la section 35 en accord avec ses partenaires des universités (comme avec ceux des ENS, de l'EHESS ou de l'EPHE), à refuser la réduction des organismes de recherche à une somme de « moyens humains » et la disparition du chercheur au profit de « temps de recherche » distribués par bribes aux uns et aux autres. Elle entend poursuivre son effort de développer à ce sujet une réflexion concertée avec les partenaires universitaires, en abordant notamment la question de l'évaluation, qui passe par l'harmonisation des procédures et des calendriers.

Elle prête également toute attention à des problèmes rencontrés quotidiennement dans l'interaction entre CNRS et universités ; ainsi, la section 35 est soucieuse du devenir des délégations (les universitaires, tout comme les chercheurs du CNRS, ont le sentiment largement partagé d'une opacité et d'une inéquité de la procédure), des détachements (pas de concours officiellement ouvert étant donné le faible nombre de postes, mais un « concours officieux » depuis 2008) et, informée par les partenaires universitaires plutôt que par les canaux propres du CNRS, elle se préoccupe du dispositif d'attribution des chaires d'excellence qui, en l'état, s'avèrent très coûteuses pour l'université et répondent mal, à la différence des délégations, à la nécessité d'organiser, pour les enseignants-chercheurs en poste (et chargés de tâches administratives et d'enseignement), de véritables périodes exclusivement dévolues à la recherche.

### **La section 35 et l'AERES**

L'espace de la recherche, de son financement et de son évaluation, s'est également drastiquement modifié et complexifié depuis quelques années. Les fonctions de la section 35 en tant que telle et le travail des chercheurs tendent corrélativement à se transformer. Toute la question est de savoir si ces évolutions peuvent contribuer, et non pas nuire, au travail de recherche, et à quelles conditions. Nous sommes passés d'un mode de fonctionnement où l'évaluation des structures de recherche et

de ses membres relevait des sections du Comité National, à un mode d'évaluation scindé en deux parties : l'AERES, Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, créée en 2006, évalue les structures tandis que le Comité National continue à évaluer les chercheurs et rend des « avis de pertinence » sur les structures ou propose à sa direction scientifique des évaluations les concernant dont le statut ne saurait désormais être clair. On notera que l'AERES n'a dans son évaluation propre des structures pas vocation (ni droit) à évaluer la prospective. C'est donc sur un passé coupé de ses acteurs et coupé de son avenir que porte l'évaluation des laboratoires du CNRS par la nouvelle Agence.

En lien avec la communauté des universitaires représentée par la CPCNU (Conférence des Présidents du Conseil National des Universités) et de la communauté des chercheurs qui se reconnaît dans la CPCN (Conférence des Présidents du Comité National, CNRS), la section 35 s'interroge sur le bien-fondé d'une telle partition et souhaite que soit menée dès à présent une réflexion concertée sur l'articulation entre les différentes instances évaluatives. Elle appelle à un travail en synergie, impliquant que l'AERES, d'ailleurs en conformité avec son décret fondateur, s'appuie sur les instances d'évaluation des « établissements et organismes » que sont la CNU et le CN. Un certain nombre de points doivent tout particulièrement être discutés : critères de l'évaluation, bien sûr, mais aussi modalités de structuration des instances (par l'élection et la nomination) ainsi que rôle de chacune d'elles, rythme de l'évaluation, harmonisation des calendriers d'évaluation (notamment de la fiche CRAC, éventuellement remplacée – mais en aucun cas doublée – par la fiche RIBAC, et des évaluations biennales/quadiennales), spécificités de l'évaluation en contexte de pluridisciplinarité et d'interdisciplinarité.

### **La section 35 et l'ANR**

L'autre versant de la transformation de l'espace de la recherche ces dernières années tient à la question du financement de

la recherche. La création de l'ANR, Agence nationale de la recherche (également en 2006), joue un rôle prépondérant dans cette évolution. Si l'on replace cette création dans la politique générale de la recherche impulsée par le gouvernement depuis 2006 (loi Pacte pour la Recherche du 18/04/2006), il convient d'observer que la tendance de fond consiste à fragiliser l'un des traits constitutifs de la recherche française, à savoir la possibilité pour les chercheurs recrutés au CNRS d'initier et de développer des programmes de recherche de long terme, innovants et exigeants. Les trois aspects sont liés. Nombre de chercheurs européens et états-unis nous envient cette possibilité. Elle explique en grande partie la dimension d'attractivité des organismes français de recherche aux yeux des chercheurs étrangers, nombreux à présenter chaque année leur candidature et nombreux à y être recrutés (25 ou 27 % d'étrangers pour le CNRS). Or, la politique actuelle de financement de la recherche, dont l'ANR est un pilier central, consiste à favoriser une budgétisation fragmentée et de court terme, « au projet » : les chercheurs consacrent dès lors un temps très, et souvent trop, important à rédiger des « projets » plutôt qu'à exercer leur cœur de métier. Ces projets leur permettent, s'ils sont sélectionnés, de financer la réalisation de quelques-uns de leurs travaux, mais sur un temps bref et pas nécessairement renouvelable, et de recruter des (post-)doctorants, mais de façon toujours provisoire. Autrement dit, les chercheurs relevant de la section 35 du CNRS, comme les autres, se voient de plus en plus soumis à une logique du court terme et à une multiplication des formes de précarité, court terme et précarité dont ils savent bien l'effet néfaste sur la qualité et l'originalité de leur travail.

Sans rejeter l'intérêt de financements plus ponctuels, notamment pour des projets émergents, la section 35 préconise fortement le maintien d'un financement de la recherche qui permette à celle-ci de se déployer dans le long terme, sans être contrainte par des programmes qui relèvent du prêt-à-penser et imposent de produire des résultats à brève échéance.

## 4.2 ORIENTATION THÉMATIQUE DE LA RECHERCHE ET IMPÉRATIF D'« ACTUALITÉ »

La politique de financement de la recherche pratiquée par l'Agence nationale de la recherche n'est pas seulement un vecteur de transformation de la temporalité dans laquelle se déploient les recherches. Elle se déploie aussi dans une orientation thématique – même s'il existe chaque année une part d'appels à projets non thématiques – qui détermine de fait des orientations privilégiées en termes d'objets de recherche. La section 35 est ainsi régulièrement conviée, comme les autres sections de l'INSHS, à répondre aux enjeux sociétaux du temps présent, à se soucier des questions d'actualité et à définir à partir de ces enjeux et questions le contenu des recherches menées en son sein. Cet impératif d'« actualité » suscite plusieurs commentaires. Tout d'abord, on remarque qu'il ne peut être dépourvu d'une certaine efficacité dans un contexte où nombre de chercheurs sont durablement contractualisés en CDD. Ensuite, il fait partie des éléments qui, au même titre que le financement à court terme, contraignent les chercheurs à travailler sur des objets qui peuvent changer du jour au lendemain, sans nécessité intrinsèque, précisément au gré de l'actualité et de la volonté politique. Enfin et surtout, il asservit la recherche à un processus de définition de ses objets qui l'empêche de jouer le rôle que l'on est en droit d'attendre d'elle lorsqu'elle fait l'objet d'un financement public : à savoir éclairer de façon critique, pertinente, nouvelle l'histoire présente et passée des sociétés, proposer des interprétations innovantes et des hypothèses inédites pour rendre compte de tel ou tel phénomène, théorique ou pratique ; constituer un lieu privilégié où la culture des sociétés vit, se déploie, se transmet et se pense. Cet enjeu « sociétal » peut donc être *de facto* intégré et intériorisé, notre rapport le montre, mais à la condition expresse qu'il soit ajusté, transformé, réinventé autant que de besoin.

De ce point de vue, la section 35 préconise, en rupture avec les orientations actuelles

de la recherche par le « haut », par la seule décision politique, la réaffirmation d'une indépendance de la recherche et le refus de son instrumentalisation. Dans le même ordre d'idées, elle regrette qu'eu égard aux sciences de la vie et aux sciences exactes, on conçoive trop souvent des collaborations qui cantonnent les sciences humaines à un rôle d'enrobage éthique ou de supplément d'âme ; elle s'offusque de ce que le rôle des sciences humaines et sociales soit aujourd'hui redéfini dans un sens exclusivement destiné à expliquer ou justifier, auprès du public, les orientations des sciences exactes et des sciences de la vie. Enfin, elle met en cause le principe qui consiste à distinguer, eu égard aux « enjeux sociétaux », des objets de recherche légitimes et actuels et d'autres illégitimes et surannés : non seulement certains thèmes qui peuvent apparaître, au vu d'un jugement rapide, comme dépourvus d'intérêt immédiat ou futur, constituent parfois les détours nécessaires pour apporter un éclairage inédit à une situation présente ; mais il n'existe par ailleurs pas de position surplombante qui permette d'anticiper la pertinence d'une recherche au regard de son actualité présente et future. De ce point de vue, la section 35 estime que l'orientation thématique *via* le financement de la recherche est un principe de fonctionnement discutable, surtout s'il est généralisé.

### 4.3 LANGUES DE LA RECHERCHE ET IMPÉRATIF D'« INTERNATIONALISATION »

Les chercheurs sont par ailleurs invités à se montrer soucieux de la diffusion et de la reconnaissance internationale de leurs travaux à travers diverses injonctions que l'on peut réunir sous l'impératif d'« internationalisation ». Ce souci de diffusion et de reconnaissance internationale, et plus largement de partage mondial des hypothèses, des idées et des paradigmes interprétatifs est une pratique bien fondée.

Notre question est la suivante : en quelle langue doit s'exprimer la recherche menée au CNRS ? Les chercheurs se voient-ils dotés des moyens adaptés à la politique internationale de la recherche préconisée par leur organisme ? Comme le soulignait déjà le rapport de conjoncture précédent, il importe de faire en sorte que le français puisse continuer à jouer son rôle de langue de communication scientifique. Le recours à l'anglais, souvent recommandé, ne doit pas se faire au détriment du français et il ne doit pas non plus s'entendre à l'exclusion d'autres langues. En bref, tant pour la littérature que la philosophie, la possibilité de s'exprimer et de penser en plus d'une langue apparaît essentielle aux yeux de la section 35.

Tout en reconnaissant l'effort du CNRS pour favoriser l'internationalisation de la recherche menée au sein du CNRS, à travers des outils comme HAL ou le TGE Adonis en cours de développement, la section préconise qu'une aide financière conséquente et substantielle soit en outre accordée aux chercheurs pour la traduction de leurs travaux (*via* des dotations budgétaires *ad hoc* aux structures de recherche et aux revues) et le cas échéant à leur diffusion sur *internet* (bien entendu, lorsque ces travaux ne sont pas soumis à des droits). Elle préconise également qu'une aide conséquente soit mise en place ou développée pour la confection et la gestion des dossiers lourds, liés en particulier à l'Union Européenne, y compris pour la traduction de ces dossiers en anglais (ou plutôt selon le *globish* en vigueur). Elle souhaite que les modalités d'évaluation de ces dossiers soient rediscutées en fonction des disciplines (l'*impact factor* de Claude Lévi-Strauss est toujours susceptible d'être inférieur à celui de Faurisson) et qu'un lobbying *bottom-up* efficace soit mis en place par le CNRS en Sciences Humaines et Sociales.

(VOIR ANNEXE 3 : L'ENGAGEMENT INTERNATIONAL DE LA SECTION 35, EXEMPLES).

## 4.4 RÉMUNÉRATION DE LA RECHERCHE ET IMPÉRATIF D'« EXCELLENCE »

Comme les autres sections du Comité national, la section 35 a été confrontée, entre autres impératifs d'excellence (Campus d'excellence, EquipEx, LabEx,) à la question de la prime dite d'« excellence scientifique » (PES). Sur ce sujet, elle a d'abord adopté une motion lors de sa session de l'automne 2009, qui explicite son désaccord de principe avec la logique de la prime d'excellence scientifique mise en place par le gouvernement. Avec la CPCN, elle a souhaité en souligner avant tout les effets pervers : promotion d'une minorité d'individus au détriment des équipes, montant disproportionné par rapport aux salaires et pour une durée parfois indéterminée. Elle a également dénoncé les modalités d'attribution de la prime alors envisagées (arbitraire des critères, suivisme de prix déjà attribués et pourvus, délégitimant l'organisme et ne tenant aucun compte des disparités disciplinaires). Lors de la session d'automne 2009, elle a décidé de surseoir à la proposition de médailles de bronze et d'argent et prôné qu'à défaut d'une réelle revalorisation de la carrière des chercheurs, cette prime soit attribuée à tous les nouveaux entrants à l'occasion de leur titularisation, pour saluer l'excellence des recrutements au CNRS et pallier le niveau scandaleux des salaires d'embauche. Elle continue à considérer que la prime ne saurait tenir lieu de revalorisation salariale et la trouve inadaptée aux exigences de la recherche scientifique, qui relève d'abord d'un travail collectif mené au sein d'une équipe. Elle invite de nouveau la direction à attribuer la PES aux entrants CR, au moment de leur titularisation.

Impératifs d'« adaptation », d'« actualité », d'« internationalisation » et d'« excellence » : la section 35 s'inscrit en porte-à-faux avec ces impératifs lorsqu'en vérité, ils véhiculent un discours d'asservissement de la recherche et jettent le soupçon sur ses acteurs, tour à tour accusés d'être rétrogrades et en marge de la réalité, de perdre leur temps à des recherches

sans intérêt pour la société, de gaspiller l'argent public, de s'auto-évaluer selon des procédures opaques et peu équitables ou encore d'être invisibles sur la scène internationale.

D'une manière générale, la prolifération des financements orthogonaux aux laboratoires, que ces financements soient liés à des projets portés par des individus (sur le plan national comme sur le plan européen), ou qu'ils soient liés à une politique de site au détriment d'une réelle cohérence scientifique (LabEx), ne peut que provoquer à court terme l'éclatement des structures actuelles de la recherche, non seulement dans ce qu'elles ont de discutabile (et de perfectible), mais dans ce qu'elles ont de plus excellent et de plus performant. La section 35 met solennellement en garde sa gouvernance qui risque aujourd'hui de jeter le bébé avec l'eau du bain.

## 5 – PRÉCONISATIONS

1. La section met particulièrement en garde contre un guichet unique, ministériel par exemple, donnant accès de fait à une majorité des financements.

2. Elle recommande d'harmoniser les pratiques et les calendriers de l'évaluation avec ceux des universités, et de repenser la meilleure synergie possible avec l'AERES, qui inclut une redistribution des compétences avec le Comité national et le Conseil National des Universités.

3. Elle attire l'attention sur l'importance cruciale des post-doctorats. Elle souhaite qu'ils soient rétablis au CNRS de manière claire et lisible, et souligne que l'on ne saurait se contenter des CDD de l'ANR. Une concertation est absolument nécessaire avec les Instituts d'Études Avancées, la Mairie de Paris (qui fournit souvent l'essentiel de nos postes de post-doctorants), les grandes fondations (par exemple la fondation des Treilles, qui donne des « prix » tenant lieu de bourses non imposables).

Un *statu quo* serait extrêmement dommageable aux post-doctorants français, qui sont aujourd'hui contraints de s'expatrier durablement, voire définitivement, au lieu d'engranger une expérience à l'étranger. Bref, il est urgent de prendre conscience que nous favorisons aujourd'hui la fuite des cerveaux.

4. Elle recommande de pallier la dispersion géographique et l'effet d'émiettement liés à la nouvelle cartographie universitaire ainsi qu'à la multiplication des nouvelles structures (PRES, laboratoires d'excellence, etc.), et de dépasser une compétition dommageable à la visibilité internationale du CNRS, en favorisant d'autres types de coopération comme, par exemple, les réseaux thématiques. On peut prendre l'exemple du RTP « Humanités classiques » en cours de création, qui comprend les disciplines suivantes : philosophie antique, littératures anciennes, philologie, linguistique, archéologie, anthropologie, histoire ancienne, histoire du fait religieux, histoire de l'art et iconographie, histoire et théorie des droits antiques, et rassemble des équipes de statut différent (EA, UMR, UPR, UPS) pour permettre la collaboration entre des établissements autonomes (CNRS, EHESS, ENS Ulm, EPHE, universités de Lille I & de Lille III, universités de Paris I, Paris III, Paris IV & Paris VII, Université de Saint-Étienne) afin de constituer un pôle d'expertise et de recherche de niveau international. D'une manière générale, il faut éviter les effets pervers d'une logique de site indifférente ou orthogonale à la logique scientifique.

5. Elle préconise de faciliter et de structurer la recherche, en redéfinissant par exemple de nouvelles CID, autour d'objets émergents au croisement des disciplines : ainsi « traduction-transmission-numérisation », ou, parce que c'est un objet qui n'a pas aujourd'hui encore émergé en France au plus haut niveau théorique et scientifique, les études de genre.

6. Enfin, la section constitue un cadre particulièrement propice au développement de grands projets d'édition, qu'il s'agisse de programmes d'éditions savantes, papier ou numérique, de traductions, de constitution d'outils, par exemple des banques de données et des dictionnaires, dont la réalisation réclame

de longues années et le plus souvent un engagement collectif et interdisciplinaire. On constate au vu de l'ANNEXE 2 (recensement encore provisoire mais très impressionnant) que la section 35 est l'une des premières forces éditoriales françaises, et pas seulement comme partenaire privilégié des éditions du CNRS ou d'éditions universitaires souvent confidentielles. La collaboration avec les entreprises (nos « contrats ») est ainsi assurée tout naturellement de manière exceptionnellement solide et sans coupure entre le tissu national et international. On peut même dire que le CNRS constitue structurellement, via l'ensemble du corps de ses chercheurs (et non par les aides ponctuelles qu'il peut accorder à telle ou telle revue ou tel ou tel ouvrage), l'aide la plus massive apportée à l'édition privée française, à côté du CNL. L'une des préconisations essentielles de la section est que l'INSHS et le CNRS en prennent conscience, en reconnaissent toute l'importance, et mènent une politique de concertation globale avec les partenaires publics et privés, au moins dans certains domaines précis : aide aux revues, traduction, numérisation et mise en ligne, grands corpus, outils, publications bi- ou plurilingues. Le grand emprunt constitue une occasion favorable pour une telle remise à plat, avec répartition/reconnaissance des compétences et mise en synergie des moyens. La section préconise donc très concrètement :

a) une rencontre rapide, puis l'établissement de liens institutionnels réguliers, entre l'INSHS (et plus largement le CNRS), les représentants des éditeurs, des grands outils (Adonis, Hal), le CNL, la DGLFLF, la BNF sur tous les sujets relatifs à la numérisation et à la traduction ;

b) une première manifestation au Salon du Livre, organisée par le CNRS, pour rendre visible le rôle des chercheurs dans le monde éditorial (dont les Éditions du CNRS ne constituent qu'une faible partie), sous forme d'expositions et de rencontres thématiques entre chercheurs et éditeurs.

Il importe de favoriser du même geste la publication de recherches originales en français, leur traduction en anglais et/ou en d'au-

tres langues choisies au cas par cas, leur numérisation et indexation et leur mise en ligne simultanée en plusieurs langues. C'est à ce prix seulement que l'on engagera le cercle vertueux permettant de favoriser la recherche en langue française, ou le français comme langue

de la recherche, et sa valorisation dans les classements mondiaux, via l'anglais comme langue au moins provisoire de la présence internationale et de la communication mondialisée. Cette valorisation-là est déterminante pour notre recherche en sciences humaines et sociales.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 COMPOSITION DE LA SECTION

#### Types d'unité

Parmi les 49 unités qui composent la section, 35 en relèvent à titre principal. De ce point de vue, la section se situe dans la moyenne, les 40 sections du CNRS pourvoyant chacune entre 1 % et 5 % de son effectif total. 26 % des chercheurs évalués par elle appartiennent à une unité qui a une autre section principale (la moyenne au CNRS, toutes sections confondues, étant de 35 %).

Les structures de recherche sont de nature diverse : si l'on s'en tient aux unités qui relèvent de la section 35 à titre principal, on compte 1 EAC, 1 FR, 1 FRE, 3 GDR, 1 UMI, 19 UMR, 1 UPR, 1 UPS, 7 USR. Les unités qui relèvent d'une autre section à titre principal se distribuent quant à elles pour l'essentiel en UMR (au nombre de 8), ainsi qu'en 2 UMS, 1 UPR, 2 UPS et 1 USR.

Certaines de ces unités s'inscrivent dans une politique de recherche commune avec les 22 Maisons des Sciences de l'Homme constituées en réseau depuis 2006. Environ la moitié des effectifs de l'INSHS est engagée dans une telle politique qui vise à la fois l'ancrage territorial, le développement d'une identité scientifique spécifique et la coopération internationale (cf. <http://www.cnrs.fr/inshs/recherche/MSH.htm>). Pour ce qui concerne la section 35, cependant, seule une unité, l'UMS 3108 (Maison des Sciences de

l'Homme de Clermont-Ferrand), s'inscrit dans un tel réseau.

#### Localisation

Pour les 49 unités, la cartographie fait écho à la structure encéphalique de la société française et à l'étranger, correspond à une répartition fortement tributaire des relations internationales de la France.

#### Sur le territoire français

31 unités sont localisées à Paris ou en région parisienne, pour la plupart des UMR (27). 11 unités se répartissent dans les régions, hors Île-de-France : Clermont-Ferrand (1), Lyon (3), Montpellier (1), Aix-en-Provence (1), Poitiers (1), Tours (1), Brest (1), Villeneuve d'Ascq (1), Nancy (1). La section 35 comprend que dans la présente conjoncture notre organisme ne puisse multiplier les laboratoires, mais elle souhaite servir de moteur, de lien, et d'appui pour la création de nouvelles unités en province lorsqu'un ensemble de recherches se dégage et qu'un projet innovant parvient à maturité dans une région où aucun laboratoire n'existe.

#### À l'étranger

Les unités installées à l'étranger sont des USR (unité de service et de recherche), à l'exception d'une unique UMI (unité mixte internationale), qui relève d'un accord entre le CNRS et la l'Uni-

versité de New York. La création des USR est en grande partie liée au contexte politique et historique. Ainsi, la Maison française d'Oxford est mise en place au lendemain de la seconde guerre mondiale ; l'Institut français de Pondichéry a été institué à la faveur du traité de cession des établissements français en Inde (1955) ; le Centre Marc Bloch, centre franco-allemand de recherche en sciences sociales, est créé au lendemain de la chute du Mur de Berlin (1992, inauguration 1994).

De façon plus générale, à l'heure actuelle, l'ensemble des unités localisées à l'étranger relève de la collaboration entre le Ministère des affaires étrangères et le CNRS. Un accord a été signé en 2007, reconnaissant à 20 des 27 Instituts Français de Recherche à l'étranger le statut d'Unité Mixte de Recherche à l'étranger du MAE et du CNRS (UMIFRE). Les UMIFRE ont vocation d'être des laboratoires virtuels à l'image des Laboratoires Internationaux ou Européens Associés (LIA/LEA) du CNRS qui réunissent autour des IFRE les unités métropolitaines du CNRS participant à leurs programmes de recherche.

Cette co-implication du CNRS et du Ministère des affaires étrangères vaut pour les autres USR : l'USR 3331 Asie orientale créée en 1991 (par transformation d'une structure préexistante, l'antenne de Sinologie née en 1978) ; l'USR 3131, Institut français d'études anatoliennes ; l'USR3060, Centre franco-russe de recherches en sciences humaines et sociales de Moscou ; et la toute récente USR337-Amérique latine, qui regroupe depuis janvier 2010 l'Institut Français d'Études Andines et le CEMCA Amérique centrale (Centro de estudios mexicanos e centroamericanos).

La plupart des unités localisées à l'étranger hébergent de façon temporaire des recherches, soutenant financièrement des projets, accueillant les chercheurs français dont les travaux impliquent un séjour sur place. Elles contribuent aussi au maintien d'échanges parfois anciens entre les chercheurs du pays dans lequel elles sont implantées et les chercheurs français, via – par exemple à Moscou, Oxford ou Berlin – la mise en place d'une bibliothèque, de programmes éditoriaux, de séminaires. Certains axes de recherche privilégiés émergent dans la plupart d'entre elles et structurent le travail de recherche. 7 axes ont ainsi été retenus par l'UMI de New-York : nais-

sance du savoir, érudition antique, post-colonialisme et lumières, modernités plurielles et transnationales, mémoire et mémorisation, traduction et traductibilité, corps, esprit et conscience ; pour sa part, le centre Marc Bloch s'organise autour de 4 thématiques principales : exercices et représentations du pouvoir ; reconfiguration des espaces en Europe ; savoirs et pratiques ; philosophie et théorie sociale.

L'internationalisation de la recherche française appelée de ses vœux par la direction du CNRS passe en particulier par ces unités hors des frontières, qui permettent de nouer des relations scientifiques fortes et adaptées. Leur maintien ou leur implantation relèvent de choix stratégiques : importance des Etats-Unis et de la Chine pour notre visibilité, importance de la francophonie, de la Méditerranée, des mondes africains, sud-américain, indien et arabe pour le maintien et le développement de zones d'influence et de réciprocité.

Enfin, il faut noter que les relations internationales de la recherche reposent tout autant sur des liens de chercheur à chercheur, d'équipe à équipe, formalisés ou non dans des conventions de coopération ou des programmes de recherche communs. Cette part-là, peut-être moins visible institutionnellement, n'en est pas moins essentielle et du point de vue d'une politique internationale de la recherche, c'est l'ensemble de ces éléments – unités à l'étranger, conventions de recherche et programmes internationaux, liens individuels et collectifs de recherche – qui doit être cartographié et mis en cohérence (Voir ANNEXE 3).

**Tableau récapitulatif : nature, nombre et localisation des unités de recherche**

EAC: équipe d'accueil conventionnée	1	Paris
FR: fédération de recherche	1	Île de France
FRE: formation de recherche en évolution	1	Paris
GDR: groupement de recherche	3	Paris (2), Lyon (1)

UMI: unité mixte internationale	1	New York (USA)
UMR: unité mixte de recherche	27	Paris (17), Île de France (1) Lyon (2), Montpellier (1), Aix-en Provence (1), Poitiers (1), Brest (1), Tours (1), Nancy (1), Villeneuve d'Ascq (1)
UMS: unité mixte de service	2	Paris (1), Clermont-Ferrand (1)
UPR: unité propre de recherche	2	Paris (1), Île de France (1)
UPS: unité propre de service	3	Paris (2), Île de France (1)
USR: unité de service et de recherche	8	Russie (1), Grande-Bretagne (1), Allemagne (1), Turquie (1), Inde (1), Chine (1), Mexique (1)

## ANNEXE 2

### LA FORCE ÉDITORIALE DE LA SECTION 35 REVUES, COLLECTIONS, OUTILS ET CORPUS

1. Revues et périodiques qu'un ou plusieurs membres (chercheurs et/ou ingénieurs) de la sec-

Titre	Labora- toires	Participa- tion des personnels	Édition	Date création	Périodi- cité	Type	Langues
<i>Acta Musicologica</i>	UMR 6576	dir	Bärenreiter/ Société inter- nationale de musicologie	2000	annuelle	papier	multilingue
<i>Actual Marx</i>	UMR 5037	dir	PUF	Jacques Bidet et Jacques Texier 1987	semes- trielle	papier + cairn + site	fr, anglais, allemand, italien, espagnol, portugais et japonais ; ed argentine, brésil,italie

tion 35 dirige, co-dirige, ou à l'un des comités duquel il appartient (comité scientifique, comité de rédaction, comité éditorial, etc.)

[Ce tableau a vocation à être complété]

Total = 204

2. Séries et collections dirigées ou co-dirigées par un ou plusieurs chercheurs de la section 35.

[Ce tableau a vocation à être complété].

Total = 154

3. Corpus, outils et bases de données dirigés ou développés par les chercheurs et/ou les ingénieurs de la section 35

[Ce tableau a vocation à être complété].

Code couleur pour 3

<i>Productions numérisées, disponibles sur internet</i>
<i>Dictionnaires</i>
<i>Éditions d'outils de musicologie, créations musicales</i>

Total = 218

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Aitia Regards sur la culture hellénistique au XX<sup>e</sup> siècle</i>	UMR 5037	dir	ens	2010	annuelle	papier + cairn (libre)	
<i>Alliage</i>	UMR 8163	CR	association ANAIS, diff seuil	1989	semestrielle	papier + site	fr
<i>ALMA (Archivum Latinitatis Medii Aevi)</i>	UPR 841	CE	Union Académique Internationale	1924	annuelle	papier + num (G)	multilingue
<i>Alter</i>	UMR 8547	CR	association Alter	1993	annuelle	papier	multilingue
<i>Annales d'Economie et de Statistique</i>	UMR 8137	CR	Institut Français d'Études Andines	1986	trimestrielle	papier	fr, anglais
<i>Annales. Histoire, sciences sociales</i>	UMR 8131,8558	CD	internationale	1929 Marc Bloch, Lucien Febvre	bimestrielle	papier, cairn, persee	fr
<i>Arabic Sciences and Philosophy</i>	UMR 7219	dir	Cambridge University Press	1991	semestrielle	papier	fr, anglais
<i>Archiv für Sozialgeschichte der deutschen Literatur</i>	UMR 8547	CR	Max Niemeyer Verlages.	1976	semestrielle	papier	alld, fr, anglais
<i>Archives de philosophie</i>	UMR 8547, 5037	CR + CS	Centre Sèvres – Facultés jésuites de Paris	1922	3n <sup>o</sup> /an	papier + cairn	fr
<i>Ars interpretandi</i>	UMR 8547	CR	Carocci editore S.p.A., Roma	1996	annuelle	papier	it, anglais, alld
<i>Asteiron</i>	UMR 8137, 5037	dir	numérique	2003	annuelle	site	fr
<i>Balkan Journal of Philosophy</i>	UMR 8129	CE	academic publishing house	2009	annuelle	papier	anglais
<i>Bibliographie Annuelle du Moyen Âge Tardif</i>	UPR 841	dir	Brepols	1991	annuelle	papier	fr

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Biological Theory</i>	UMR 8129	CE	The MIT Press and the Konrad Lorenz Institute for Evolution and Cognition Research.	2005	trimestrielle	papier	anglais,
<i>Biology and Philosophy</i>	UMR 8129	CE	Springer Netherlands	1986	5n°/an	papier + num	anglais
<i>Bulletin de la Société française de philosophie</i>	UMR 8563	dir	Vrin	1901	trimestrielle	papier	fr
<i>Bulletin de la Société J-K Huysmans</i>	UMR 6563	dir publication	H. Champion	1928	annuelle	papier	fr
<i>Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines</i>	USR 3337	IFEA dir	Institut Français d'Études Andines	1994	semestrielle	papier	fr, espagnol
<i>Bulletin des études renaniennes</i>	UMR 6563	dir, CR	Société des études renaniennes (association)	1968	semestrielle	papier	fr
<i>Bulletin d'informations proustiennes</i>	UMR 8132	dir	rue d'Ulm	1975	semestrielle	papier + num	fr
<i>Bulletin du Patrimoine</i>	UMR 5037	ed		1993	annuelle	papier	fr
<i>Cahiers Claude Debussy</i>	UMR 200	dir	Centre de documentation Claude Debussy	1974	annuelle	papier	fr
<i>Cahiers de civilisation médiévale</i>	UMR 6223	dir	CÉSCM	1958	trimestrielle	papier	fr
<i>Cahiers de l'Équipe de Recherche sur la Réforme et la Contre-Réforme</i>	UMR 5037	ed	PUBP			papier	fr
<i>Cahiers de recherche d'ETOS. Éthique, Technologies, Organisations, Société</i>	UMR 8137	dir	Institut Telecom	2005	annuelle	papier	fr

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Cabiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences</i>	UMR 5037	dir	ENS Éditions			papier	fr
<i>Cabiers du Cirem</i>	UMR 9912	CR	Centre International de Recherches en Esthétique Musicale			papier	fr
<i>Cabiers du CREA</i>	UMR 7656	dir	Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée	1982		papier	fr
<i>Cabiers Edmond et Jules de Goncourt</i>	UMR 6563	dir	Société des Amis des frères Goncourt	1994	annuelle	papier	fr
<i>Cabiers Élisabéthains</i>	UMR 5186	dir	UMR	1972	semestrielle	papier	anglais
<i>cabiers Montesquieu</i>	UMR 5037	dir	Liguori Editore	1989	sans	papier	fr
<i>Cabiers naturalistes</i>	UMR 8132	ed	Société littéraire des Amis d'Émile Zola/ ITEM-CNRS/ GRASSET	1955	annuelle	papier	fr
<i>Cabiers philosophiques d'Afrique</i>	UMR 8163	CR	Presses Universitaires de Ouagadougou	2002		papier	fr
<i>Cause commune</i>	UMR 8137	CR	Le Cerf	2007	semestrielle	papier	fr
<i>Chôra. Revue d'études anciennes et médiévales. Philosophie, théologie, sciences</i>	UMR 8061	dir	Polirom, Vrin				
<i>Chroniques de Port-Royal</i>	UMR 8599	dir	Vrin	1950	annuelle	papier + num	fr
<i>Chroniques slaves</i>	UMR 8132	CR	ELLUG	2005	annuelle	papier	fr, russe
<i>Chrysopoeia</i>	UPR 76	dir	Edidit	1987	biannuelle	papier	fr

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Circuit : Musiques contemporaines</i>	UMR 9912	CR	Presses de l'Université de Montréal	1990	annuelle	papier + erudit	fr
<i>Cités</i>	UMR 8132	CR	PUF	2000	trimestrielle	papier	fr
<i>Cognitive Science</i>	UMR 8129	CE					
<i>Commentaire</i>	UMR 8036	CR	Commentaire	1978	trimestrielle	papier + support num	fr
<i>Comparatio</i>	UMR 8547	CR	Carl Winter (Heidelberg)	2009	semestrielle	papier	fr, anglais, allemand
<i>Compass</i>	UMR 8129	CE					
<i>Controverses. Revue d'idées</i>	UMR 8137	CE	Éditions de l'Éclat	2006	semestrielle	papier	fr
<i>Copyright Volumes!</i>	UMR 7117, FRE 3307	CS	Seteun (Paris)	2002	semestrielle	papier	fr
<i>Courrier du centre International Blaise Pascal</i>	UMR 5037	dir	PUBP				
<i>Critique</i>	UPS 3285	CR	ed. de Minuit	1946 G.Bataille	mensuelle	papier	fr
<i>Culture &amp; psychology</i>	UMR 7656	CR	Sage publication	1995	trimestrielle	papier + num	anglais
<i>Data (Documents, Archives de Travail &amp; Arguments)</i>	UMR 5037	dir	Cerphi	1996	mensuelle	papier + num	fr
<i>Dedale : revue internationale semestrielle</i>	UMR 7172	CR	Paris : Dédale en Méditerranée/ Maisonneuve & Larose	1995	semestrielle	papier + num	fr
<i>Demeter</i>	UMR	dir	Centre d'Étude des Arts contemporains	2002	biannuelle	num	fr
<i>Dialectica. International Journal of Philosophy</i>	UMR 8129	CE	Blackwell-Wiley Publishing.	1947	trimestrielle	papier + num	fr, anglais, allemand

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Disputatio. International Journal of Philosophy</i>	UMR 8129	CE	The Philosophy Centre of the University of Lisbon	1996	trimestrielle	papier	anglais
<i>Dostoevsky review</i>	UMR 8132	CR					
<i>Double Jeu</i>	UMR 7172	CL	Presses Universitaires de Caen	2003	annuelle	papier	fr
<i>Droit</i>	UMR 8137	CR					
<i>Dynamics of Asymmetric Conflicts</i>	UMR 8129	CE	Routledge				
<i>Ebisu-Études Japonaises</i>	USR 3331	dir	MFJ, Bureau français, 3-9-25, Ebisu, Shibuya-ku	1993	semestrielle	papier + site	
<i>Economics and Philosophy</i>	UMR 8137	CR	Cambridge University Press (CUP)				
<i>Economie Publique</i>	UMR 8137	CR	Institut d'économie publique (IDEP)	1998			
<i>English Language and Linguistics</i>	UMR 8163	CR	Aarts Bas, University College London, Royaume-Uni	1995			
<i>Epokbè</i>	UMR 8547		Jérôme million	1990			
<i>Esprit</i>	UMR 8163	CR	Revue Esprit	1932			
<i>Estudios jurídicos</i>			Editorial Porrua	1996			
<i>Études du CRIF</i>	UMR 8137	CE	Crif				
<i>Études françaises</i>	UPS 3285	CR	Les Presses de l'Université de Montréal				
<i>Études philosophiques</i>	UMR 8061,8163,-8547	CR, sec redac	PUF	Gaston Berger en 1926	trimestrielle	papier + cairn	fr
<i>European Journal of Analytic Philosophy</i>	UMR 8129	CE	Majda Trobok (University of Rijeka)	2005			

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>European Review of Philosophy</i>	UMR 8129	CE	Roberto Casati, Institut Jean CNRS / Nicod	1994			
<i>Extrême orient, extrême occident</i>	UMR 7219	dir	Presses Universitaires de Vincennes	1992			
<i>Facta Philosophica</i>	UPR 76	CE	groupe editorial Peter Lang				
<i>Féeries</i>	LIRE	dir	ELLUG				
<i>Flaubert, revue critique et génétique</i>	UMR 8132	DR	équipe Flaubert de l'Institut des Textes et Manuscrits Modernes				
<i>French Review</i>	UPS 3285	CR					
<i>Gazette du Livre Médiéval</i>	UPR 841	sec redac	Bibliothèque de l'Institut de recherche et d'histoire des textes	1990			
<i>Genesis: Manuscrits – Recherche – Invention</i>	ITEM, UMR 9912, UPS 3285, UMR 8132	creation, dir, CR, CS	PUPS	2002	annuelle	papier	fr
<i>Geschichte der Germanistik</i>	UMR 8547		École Normale Supérieure, Paris				
<i>Government and Opposition</i>			Paul Taggart et Helen Thompson	2009			
<i>Heidegger Studies</i>	UMR 8547		École Normale Supérieure, Paris (Heidegger-Studies)	1986			
<i>Images revues</i>	CETHA, GAHOM, Centre Louis Gernet, LAS	CR/CS		2004	trimes-trielle	revue numérique	fr
<i>Intellectica</i>	UMR 7656	CR	Intellectica	1985			

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Journal d'Archimède</i>	UMR 8163	CR					
<i>Journal de la Renaissance.</i>	UMR 6576	dir	Brepols	2000	annuelle		
<i>Journal of Agricultural and Environmental Ethics, Springer</i>	UMR 8137	CE	Springer Netherlands				
<i>Journal of Cognition &amp; Culture</i>	UMR 8129	CE	Brill				
<i>Journal of Ethnobiology</i>	UMR 8129	CE	Virginia Popper and Heather Trigg				
<i>Journal of Philosophical Logic</i>	UMR 8129	CE	Springer Netherlands				
<i>Journal of Semantics</i>	UMR 8129	CE					
<i>Journal of Social Ontology</i>	UMR 8129	CE					
<i>Journal of the British Society for Phenomenology</i>	UMR 8547						
<i>Jus politicum – revue de droit politique</i>	UMR 8137	CS		2008	semestrielle	site	fr, en, de
<i>Komparativ</i>	UMR 8547						
<i>L'Année philologique</i>	UPR 76						
<i>La Lettre clandestine</i>	UMR 8599, 5037						
<i>La Revue de synthèse</i>							
<i>La Revue russe</i>	UMR 8132	CR					
<i>La revue Voltaire</i>	UMR 8599						
<i>La Vie des idées</i>	UMR 8036	CR					
<i>Laboratoire italien – Politique et société</i>	UMR 5037	CR					
<i>Labyrinthe</i>	UPS 3285	CR					

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Labyrinthes</i>				1998	trimestrielle	papier	fr
<i>Language and Linguistics</i>	UMR 8129	CE					
<i>Le Débat</i>			gallimard	1980	bimestrielle	papier + site	fr
<i>Le Fablier</i>	UMR 8599	dir publication	Société des Amis de Jean de La Fontaine	1988	annuelle	papier	fr
<i>Le Français préclassique</i>	UMR 5037	dir					
<i>Les Cahiers du judaïsme</i>	UPS 3285	CR					
<i>Les chroniques de Port Royal</i>							
<i>Les Études philosophiques</i>	UMR 8163	dir CR	PUF	1926	trimestrielle	papier + CAIRN	fr
<i>Lettres slaves</i>	UMR 8132	CR					
<i>Lexique</i>	UMR 8163	CR					
<i>Ligeia : dossiers sur l'art</i>	UMR 7172	dir					
<i>Lingua</i>	UMR 8163	CR					
<i>Linguistic Inquiry</i>	UMR 8163	CR					
<i>Linguistics and Philosophy</i>	UMR 8129	CE					
<i>Linguistik Aktuell/ Linguistics Today</i>	UMR 8163	CR					
<i>Littérature</i>	UMR 8132	CR					
<i>LRS lettres russes</i>	UMR 8132	CR					
<i>Mathematical structures for computer science</i>	UMR 7656	dir					
<i>Metaphor and Symbol</i>	UMR 8129	CE					
<i>Méthodes !</i>	UMR 8132	CR					
<i>Methodos</i>	UMR 8163	création et CR	revue.org + +	2001	annuelle	revue numérique	fr, anglais

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Mind and Language</i>	UMR 8129	CE					
<i>Mind and Society</i>	UMR 8129						
<i>Musimédiane</i>	UMR 9912	CR					
<i>Musique Images Instruments</i>	UMR 200						
<i>Musique Images Instruments</i>	UMR 200	dir	CNRS Éditions	1995			
<i>Napoleonica. La Revue</i>			fondation Napoléon	2008	trimestrielle	CAIRN	fr
<i>Natural Language Semantics</i>	UMR 8129	CE					
<i>Notre Dame Phil. Reviews</i>	UMR 8129	CE					
<i>Nous</i>	UMR 8163	CR					
<i>Nouvelles du Livre Ancien</i>	UPR 841	SR					
<i>Orbis Phaenomenologicus</i>	UMR 8547						
<i>Oriens-Occidens</i>	UMR 7219	DR					
<i>Outreterre. Revue française de géopolitique</i>	UMR 8137	CR					
<i>Phaenomonologica</i>	UMR 8547						
<i>Phänomenologische Forschungen</i>	UMR 8547						
<i>Philosophia Scientiae</i>	UMR 8129, 7117, 8163	dir, CE			semestrielle	papier	fr
<i>Philosophie ancienne</i>	UMR 8163	CR					
<i>Philosophie antique. Problèmes, renaissances, usages</i>	UMR 8061 + UPR 76, UMR 8163	dir + CR	Presses Universitaires du Septentrion	2001	annuelle	papier	fr
<i>Philosophie et Libertinage à l'Age classique</i>	UMR 5037	dir					
<i>Population Health Metrics</i>	UMR 8137	CR					

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Positif</i>	UMR 7172	CR					
<i>Pragmalinguistique</i>	UMR 8129						
<i>Pragmatics and Cognition</i>	UMR 8129						
<i>Psaume, Bulletin de la recherche sur le psautier buguenot</i>	UMR 5037	CE					
<i>Raison Publique</i>	UMR 8137	CR					
<i>Recherches busserliennes</i>	UMR 8547						
<i>Recto-verso</i>	UMR 8132	CL, CS				numérique	
<i>REVISTAS TRACE,</i>	USR 3337	CEMCA dir		1995-2005	semestrielle	papier	
<i>Revue Binet Simon</i>	UMR 7117	dir					
<i>Revue d'histoire des mathématiques</i>	UMR 8560	CR					
<i>Revue de l'histoire des religions</i>	UMR 5037	CR					
<i>Revue de l'Aire</i>	UMR 8599						
<i>Revue de métaphysique et de morale</i>	UMR 8163	CR					
<i>Revue de musicologie</i>	UMR 9912, 200, 2162	dir + CR		1917	semestrielle	papier + JSTOR (P)	fr
<i>Revue de philosophie économique</i>	UMR 6059	soutien	Vrin	2000	semestrielle	papier, cairn	fr, anglais
<i>Revue de sémantique et de pragmatique</i>	UMR 7656	CR					
<i>Revue de synthèse</i>	UMR 5037, 8036	CR	Springer-Verlag-France	Henri Berr en 1900	trimestrielle	papier + num	fr, anglais, alld, it/ angl, alld, arabe, japonais
<i>Revue d'Économie Politique</i>	UMR 8137	CR					

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Revue des Études juives</i>	UPR 841	SR					
<i>Revue des études slaves</i>	UMS 623	dir					
<i>Revue d'Histoire des Textes</i>	UPR 841						
<i>Revue d'Histoire Littéraire de la France</i>	UMR 5032	dir					
<i>Revue d'Histoire Littéraire de la France</i>	UMR 8132, UPS 3285	dir	PUF	1894	trimestrielle + un volume de Bibliographie préparé en collaboration avec la BNF	papier, cairn	fr
<i>Revue française de Sociologie</i>	UMR 8036	CR					
<i>Revue française d'études américaines</i>	UMR 5611,7172	CR	Belin	1976	trimestrielle	papier + cairn	fr
<i>Revue germanique internationale</i>			CNRS ed				
<i>Revue Mabillon</i>	UPR 841	SR					
<i>Revue Montesquieu</i>	UMR 5037	dir					
<i>Revue philosophique de la France et de l'Étranger</i>	UMR 5037	SR	PUF	1876 T. Ribot	trimestrielle	papier, cairn	fr, anglais, alld
<i>Revue pour l'histoire du CNRS</i>	UMR 8590, 8630	CL	CNRS	1999	trimestrielle	papier + revues.org (gratuit)	fr, anglais
<i>revue russe</i>	UMR 8132	SR					
<i>Rivista di Filologia Cognitiva</i>	UMR 8129						
<i>Romania</i>	UPR 841	SR					
<i>Romanic Review</i>	UPS 3285	CR					
<i>Scena</i>	UMR 7172	CR	Russie				

Titre	Laboratoires	Participation des personnels	Édition	Date création	Périodicité	Type	Langues
<i>Scriptorium</i>	UPR 841	SR					
<i>Semantics &amp; Pragmatics</i>	UMR 8129, 8163						
<i>Sens public</i>	UMR 8137	CR					
<i>Slavonica</i>	UMR 8132	CR					
<i>Social Choice and Welfare Theoria</i>	UMR 8137	CR					
<i>Social Neuroscience</i>	UMR 8129						
<i>Studia Logica</i>	UMR 8129						
<i>Studia Spinozana</i>	UMR 5037	CR					
<i>Studies in Natural Language and Linguistic Theory</i>	UMR 8163	CR					
<i>Syntax</i>	UMR 8163	CR					
<i>Synthese</i>	UMR 8163	CR					
<i>Textuel</i>	UMR 8132	CR					
<i>The Monist</i>	UMR 8129						
<i>The Review of Politics</i>							
<i>ThéâtreS</i>	UMR 7172	CR	Presses Universitaires de Rennes				
<i>Theoria</i>	UMR 8129						
<i>Thinking and Reasoning</i>	UMR 8129						
<i>Tr@jectoires</i>	UMR 8131	dir					
<i>Transferts</i>			ed. duLérot				
<i>Transposition. Musique et sciences sociales.</i>	UMR 9912,8566	CR, CS, dir		2010	semestrielle		fr, anglais
<i>Voix allemandes</i>			Belin				
<i>Voltaire</i>	UMR 8599						
<i>Warfare</i>	UMR 8129						

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Anecdota</i>	Edidit	S. MATTON et D. KAHN	UPR 76	5 volumes parus	1995		
<i>Archives de l'Est</i>	Centre international d'étude du XVIII <sup>e</sup> siècle Ferney-Voltaire	CE	UMR 5186	2 volumes (180p)	2007		<a href="http://c18.net/18/p.php?nom=p_ae3">http://c18.net/18/p.php?nom=p_ae3</a>
<i>Arts du spectacle</i>	CNRS Éditions	Beatrice Picon Vallin	UMR 7172				
<i>Astræa Texts</i>	PULM	dir	UMR 5186	2	2008		
<i>Basalte</i>	? Paris	L. Feneyrou dir	USR 9912		dir coll		
<i>Bibliographie du XIX<sup>e</sup> siècle</i>	Presses Universitaires de Lyon	Philippe Régnier (DR CNRS)	UMR 5611				
<i>Biblioteca Andina de Bolsillo</i>		IFEA dir	USR 3337		2001		
<i>Bibliothèque de Philosophie</i>	gallimard	dir	UMR 8547				
<i>Bibliothèque de Philosophie et d'Esthétique</i>	L'Herne	dir	UMR 8547				
<i>Bibliothèque des textes philosophiques, Vrin</i>	Vrin	dir	UMR 8547				
<i>Bibliothèque d'histoire de la philosophie, Vrin</i>	Vrin	dir	UMR 8547				
<i>Bibliothèque franco-allemande</i>	Le cerf	M. Espagne dir	UMR 8547				
<i>Bibliothèque volante</i>	Éditions L'ACT MEM	dir. par Frédéric Gabriel	UMR 5037				

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>Bibliothèques virtuelles des humanistes</i>	<a href="http://www.bvb.univ-tours.fr/">http://www.bvb.univ-tours.fr/</a>				2002		
<i>Cahiers de philologie</i>	Septentrion	A. Laks dir	UMR 8061				
<i>Cahiers du Centre de Correspondances</i>	CNRS		UMR 6567	6	1998		
<i>Caute</i>	Amsterdam	dir. Laurent Bove, Frédéric Lordon et Yves Citton	UMR 5037				
<i>CHRONIQUES DE PHILOSOPHIE</i>	Dordrecht				1939		
<i>Civilisation médiévale</i>	Centre d'Études Supérieures de Civilisation Médiévale	ed + dir	UMR 6223	18	1993		
<i>Collection Anthologies PATRIMOINE MUSICAL DE France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	20	2007		
<i>Collection Astræa (XVI<sup>e</sup>-XVII<sup>e</sup> s.)</i>	PULM	dir	UMR 5186	12			
<i>Collection Bibliothèque volante</i>	L'ACT MEM	Frédéric Gabriel	UMR 5037				
<i>Collection Chœur et orchestre PATRIMOINE MUSICAL DE France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	71	1997		

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Collection Chœur PATRIMOINE MUSICAL DE France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	60	2000		
<i>Collection Cyclo</i>	Éditions du Panama	R.-P. Droit dir	UPR 76	9 titres parus	2006		
<i>Collection de l'Institut Claude Longeon</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Antony Mc-Kenna	UMR 5037				
<i>Collection de musique française</i>	Virgin classics (EMI)	dir	UMR 2162				
<i>Collection de musique française</i>	Alpha	dir	UMR 2162				
<i>Collection de musique française</i>	K617	dir	UMR 2162				
<i>Collection du CERHAC</i>	Publications de l'Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand	Dominique Descotes dir	UMR 5037				
<i>COLLECTION ÉPITOME MUSICAL</i>	Brepols	dir	UMR 6576	39 depuis 1998 + 4 à paraître	1998		
<i>COLLECTION ÉPITOME MUSICAL NUMÉRIQUE</i>	numérique	dir	UMR 6576	6			
<i>Collection Histoire et de philosophie des sciences</i>	Classiques Garnier	Bernard Joly et Vincent Jullien	UMR 5037				

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Collection Instrument seul PATRIMOINE MUSICAL DE France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	4 publications	2003		
<i>Collection Jean-Nicod Series</i>	MIP Press	F. Recanati dir	UMR 8129				
<i>Collection L'École du genre</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Éliane Viennot	UMR 5037				
<i>Collection La Cité des dames</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Éliane Viennot	UMR 5037				
<i>Collection Les anciens et les modernes: Études d'histoire de la philosophie</i>	Classiques Garnier	dir. C. Jaquet et P.-M. Morel	UMR 5037				
<i>Collection Lumière classique et Sources classiques</i>	Champion	D. Descotes	UMR 5037				
<i>Collection Monumentales Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	34	1992		
<i>collection musicologique Symétrie Recherche</i>	éditions Symétrie, Lyon	N. Donin cs	USR 9912				
<i>Collection Musique de chambre Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	63 publications	2001		
<i>Collection Œuvres lyriques Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	17	2000		

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Collection Orchestre Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	64 publications	2007		
<i>Collection Publications associées Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	1	2000		
<i>Collection Ricercar</i>	H. Champion	dir	UMR 6576	6 depuis 1997	1993		
<i>Collection Textes et Contre-textes (Littérature xvr<sup>e</sup>, xvii<sup>e</sup> et xviii<sup>e</sup> siècles)</i>	Publications de l'Université de Saint-Étienne	dir. Michèle Clément	UMR 5037				
<i>Collection Voix solistes – ensemble vocal Patrimoine musical de France</i>	CMBV ed	dir	UMR 2162	36 publications	2005		
<i>Collection Computational Music Science</i>	(IRCAM/CNRS)	Moreno Andreatta dir	USR 9912	3 titres			
<i>Collection « Logic, epistemology and the unity of science »</i>	éditions Kluwer-Springer			13	2004		
<i>Colloques du Puy-en-Velay</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Marie-Françoise Viallon	UMR 5037				
<i>Context and Content</i>	Oxford University Press	F. Recanati dir	UMR 8129				
<i>Correspondances, série xviii<sup>e</sup> siècle</i>	Paris, Éditions Honoré Champion	Geneviève Haroche-Bouzinac et Antony McKenna	UMR 5037				

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>Cuadernos de Logica, Epistemologia y Language</i>	King's College		UMR 8163	1	2007		
<i>Culture &amp; société médiévales</i>	Brepols	dir	UMR 6223	17	2003		
<i>Culture et Cognition Musicales</i>	Delatour	Mondher AYARI dir	USR 9912	1 + 1 à paraître	2005		multilingue
<i>DER Série: Bibliologia. Elementa ad librorum studia pertinentia</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Catalogue de manuscrits datés: manuscrits datés des bibliothèques de France</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Catalogue des Manuscrits datés des bibliothèques de France consacré à Cambrai</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Europa humanistica</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Lire le Moyen Âge</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Manuscrits en caractères hébreux conservés dans les bibliothèques de France. Catalogues</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série: Monumenta paleographica medii aevi</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>DER Série : Reliures médiévales des bibliothèques de France</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série : Studia artistarum. Études sur la faculté des arts dans les Universités médiévales</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				
<i>DER Série : Transmission des textes</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT				2 séries : Catalogues et Bibliographies
<i>Documents, études, répertoires (DER)</i>	CNRS/ Brepols	dir	IRHT	plus de 70 depuis 1949	1949		Plusieurs séries : série sur l'Histoire des bibliothèques médiévales dirigée par Donatella Nebbiai-Dalla Guarda et plusieurs ensembles qui fonctionnent de façon identique à des sous-collections : ainsi les Documents linguistiques de la France comprennent l'édition des chartes en langue françaises classées par province ; et l'ensemble qui comprend une Série française et une Série franco-provençale est complété par les Documents linguistiques de la Belgique romane. La « collection jaune » ne compte pas moins de six catalogues des Codices chrysostomici graeci. Le Catalogue des manuscrits classiques latins de la Bibliothèque Vaticane comptera bientôt 5 tomes
<i>Epiméthée</i>	PUF	dir	UMR 8547				
<i>Epistemon</i>	<a href="http://193.52-215.194/Epistemon/">http://193.52-215.194/Epistemon/</a>						
<i>Études et rencontres à l'Ecole des Chartes</i>	Ed. Ecole Nationale des Chartes	Dominique de Courcelles dir	UMR 5037				

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Études renaissantes</i>	Brepols	dir	UMR 6576	5 depuis 2005			
<i>Europa Humanistica</i>	Brepols	dir	UPR 841				
<i>Expériences et raisons</i>	Presses universitaires de Paris-Sorbonne	dir. Fabien Chareix et Pierre-François Moreau	UMR 5037				
<i>Histoire des deux Indes</i>	?	?	UMR 5186				
<i>Histoire des doctrines de l'antiquité classique</i>	Vrin	L. Brisson dir	UPR 76	10	1977		
<i>Histoire et philosophie des sciences</i>	Classiques Garnier	Bernard Joly et Vincent Jullien dir	UMR 5037, 8163				
<i>Histoires de famille. La parenté au Moyen Âge</i>	Brepols	dir	UMR 6223	7	2005		
<i>Images et sons</i>	Septentrion		UMR 7172				
<i>Interférences</i>	Presses Universitaires de Rennes	dir. : S. Matton et D. Kahn	UMR 7172				
<i>International Plato Studies</i>	Verlag	dir. : L. Brisson, Th. Calvo, L. Rossetti, Ch. J. Rowe et Th. Szlezák	UPR 76	5 volumes parus depuis 2005			
<i>Jean-Nicod Series</i>	MIT Press	François Récanati dir	jean nicod				
<i>Journal de la Renaissance</i>	Brepols	dir	UMR 6576	6 depuis 2000	2000		

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>L'École du genre</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Éliane Viennot	UMR 5037				
<i>L'Ordre philosophique</i>	Seuil	dir	UMR 8061		1992	2007	
<i>La Cité des dames</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Éliane Viennot	UMR 5037				
<i>La Croisée des chemins</i>	ENS-Éditions	dir. Pierre-François Moreau et Michel Senellart	UMR 5037				
<i>LA RENAISSANCE EN LIGNE</i>	numérique	dir	UMR 6576				
<i>La Vie des buguenots</i>	Éditions Honoré Champion	dir. Antony McKenna	UMR 5037				
<i>L'avocat du diable</i>	Hermann	R. Ogien	8137				
<i>LE SAVOIR DE MANTICE</i>	Honoré Champion	dir	UMR 6576	7 depuis 2006			
<i>Le Spectaculaire</i>	Presses Universitaires de Rennes		UMR 7172				
<i>Le Spectateur européen : xviii<sup>e</sup> s. (format critique, format textes)</i>		dir	UMR 5186				
<i>Le xix<sup>e</sup> siècle en représentation(s)</i>	Presses Universitaires de Saint-Étienne	Jean-Marie Roulin dir	UMR 5611				

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Les anciens et les modernes : Études d'histoire de la philosophie</i>	Classiques Garnier	dir. C. Jaquet et P.-M. Morel.	UMR 5037				
<i>Les Dix-huitièmes siècles</i>	Éditions Honoré Champion	dir. Antony McKenna et Raymond Trousson	UMR 5037				
<i>Les Essais</i>	Stock						
<i>Libre pensée et Littérature clandestine</i>	Éditions Honoré Champion	dir. Antony McKenna	UMR 5037				
<i>Lignes d'art</i>	PUF	dir. Anne Sauvagnargues et Fabienne Brugère					
<i>Lire le XVIII<sup>e</sup> siècle</i>	Presses de l'Université de Saint-Étienne	dir. Henri Duranton	UMR 5037				
<i>Littérature et Idéologie</i>	Presses Universitaires de Lyon	Philippe Régnier dir	UMR LIRE				
<i>Lumière classique et Sources classiques</i>	Champion	dir. D. Descotes	UMR 5037				
<i>Mettre en scène</i>	Actes sud	Beatrice Picon Vallin	UMR 7172				
<i>Monumenta Paleographica Medii Aevi, series graeca, series hebraica</i>	Brepols		UPR 841				

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Musique/ Sciences</i>	Ircam/ Delatour France	Jean-Michel Bardez et Moreno Andreatta	USR 9912	15 titres			
<i>Œuvres complètes de D'Alembert</i>	CNRS éditions	dir	UMR 5186				
<i>Œuvres complètes de Diderot</i>	Hermann	dir	UMR 5186				
<i>Opuscule phi</i>	Septentrion	A. Laks fond., C. Berner dir	UMR 8061, 8163				
<i>Ouvertures</i>	Fayard	B. Cassin dir	UMR 8061		2007		
<i>Ouvertures bilingues</i>	Fayard	B.Cassin dir	UMR 8061		2007		
<i>Passages (éditions du Cerf)</i>	Le Cerf	dir	UMR 8547				
<i>philosopher en sciences sociales</i>	puf	R.Ogien	UMR 8137				
<i>Philosophica</i>	Presses Universitaires du Mirail	dir	UMR 8547	5	2001		
<i>PHILOSOPHIE DE L'ÉDUCATION / PHILOSOPHY OF EDUCATION</i>	Verlag			1	2009		
<i>Philosophies</i>	PUF	dir. Ali Benmakhlouf, Jean-Pierre Lefebvre, Pierre-François Moreau	UMR 5037				
<i>Planète Libre</i>	ITEM	dir					
<i>Point bilingue</i>	Seuil	dir B. Cassin	UMR 8160		1995	2007	

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>Politiques</i>	Classiques Garnier	dir. Bruno Bernardi et Christian Nadeau	UMR 5037				
<i>Problèmes et controverses</i>	Vrin	dir	UMR 8547	7	1996		
<i>PROBLÈMES OUVERTS/OPEN PROBLEMS</i>				1	à paraître		
<i>PROBLÈMES PHILOSOPHIQUES D'AUJOURD'HUI / PHILOSOPHICAL PROBLEMS TODAY</i>	Le Cerf			4	1994		
<i>Quadrige Manuels</i>	PUF	L. Brisson et J.-F. Pradeau	UPR 76	3			
<i>Rayon Philo</i>	J. Chambon	C. Tiercelin dir	UMR 8129				
<i>Reliures Médiévales des Bibliothèques de France</i>	Brepols		UPR 841				
<i>Ricerca</i>	H. Champion	dir	UMR 6576				
<i>Vers l'Orient</i>			UMR 5611		à paraître 2011		
<i>Sciences de la musique</i>	CNRS éditions	Alessandro di Profio cr	UMR 200				
<i>Sciences de la musique</i>	CNRS Éditions		UMR 200	14	2000		
<i>Sciences de la musique Série Études</i>	CNRS éditions	Alessandro di Profio cr	UMR 200	3 titres			

<b>Titre</b>	<b>Édition</b>	<b>Participation des personnels</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>nb publications concernées</b>	<b>Création</b>	<b>Date de fin de collection</b>	
<i>Sciences de la musique Série Références</i>	CNRS éditions	Alessandro di Profio cr	UMR 200	1 titre			
<i>Série Catalogues</i>	Éditions Klincksieck, Pierre Mardaga et Olms	ed + dir	UMR 2162				
<i>Série DER Documents linguistiques de la France</i>	CNRS/ BRepols	dir	IRHT				
<i>Série DER Histoire des bibliothèques médiévales</i>	CNRS/ Brepols	dir Donatella Nebbiai-Dalla Guarda	IRHT				série DER
<i>Série Études</i>	Éditions Klincksieck, Pierre Mardaga et Olms	ed + dir	UMR 2162				
<i>Série Hors-collection</i>	Éditions Klincksieck, Pierre Mardaga et Olms	ed + dir	UMR 2162				
<i>Série Recueil de texte</i>	Éditions Klincksieck, Pierre Mardaga et Olms	ed + dir	UMR 2162				
<i>Série Silexicales</i>	UMR 8163		UMR 8163	5	1997		
<i>Styles du savoir, Défense et illustration de la pensée à l'âge classique</i>	Brepols	dir. : S. Taussig et P. Caye	UPR 76	8 volumes parus	2004		

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>TEXTES « PHILOSOPHIE ET COMMUNAUTÉ MONDIALE », coll. internationale</i>	variables			29	1959		
<i>Textes et Contre-textes (Littérature XVI<sup>e</sup>, XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles)</i>	Publications de l'Université de Saint-Étienne	dir. Michèle Clément	UMR 5037	depuis 2001			
<i>Textes et Traditions</i>	Vrin	dir. : R. Goulet, M.-O. Goulet-Cazé et Ph. Hoffmann	UPR 76	20 livres en 23 volumes parus	2001		
<i>Textes et travaux de Chrysopoeia</i>		dir. : S. Matton et D. Kahn	UPR 76	10 titres parus (11 volumes)	2000		
<i>Textes vernaculaires du Moyen Âge</i>	Brepols	dir	UMR 6223	6	2005		
<i>TH XX</i>	L'âge d'homme	dir	UMR 7172				
<i>Theta8</i>	<a href="http://umr6576.cesr.univ-tours.fr/publications/Theta8/index.php">http://umr6576.cesr.univ-tours.fr/publications/Theta8/index.php</a>		CESR		2009		
<i>traduction des oeuvres de Platon et de Plotin</i>	Garnier & Classiques Garnier	L. Brisson et JF Pradeau dir	UPR 76				
<i>traduction des Œuvres de Platon et des Œuvres de Plotin</i>	GF	dir. : L. Brisson et J.-F. Pradeau	UPR 76				

Titre	Édition	Participation des personnels	Laboratoires	nb publications concernées	Création	Date de fin de collection	
<i>Traductions introuvables</i>	<a href="http://umr6576.cesr.univ-tours.fr/publications/traductions_introuvables/">http://umr6576.cesr.univ-tours.fr/publications/traductions_introuvables/</a>				2008		
<i>Travaux de l'Institut Français d'Études Andines</i>		IFEA dir	USR 3337		1949		
<i>Travaux de Philosophie</i>	Honoré Champion	dir. Pierre-François Moreau	UMR 5037				
<i>Travaux et documents du Groupe de recherches spinozistes</i>	Presses universitaires de Paris-Sorbonne	dir. Pierre-François Moreau	UMR 5037				
<i>une collection sur Louise Michel</i>	PUL	Claude Rédat dir	UMR 5611				
<i>Voix allemandes</i>	Belin	M. Espagne dir	UMR 8547				

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
ADONIS	UPS 2916					TGE
<i>Ædilis : éditions en ligne sur le site web de l'IRHT</i>	IRHT		ed + aut			support éditorial en ligne
<i>Ampère et l'histoire de l'électricité</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.ampere.cnrs.fr/">http://www.ampere.cnrs.fr/</a>	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Anthologie bilingue (anglais) des premiers philosophes grecs</i>	UMR 8061	Fayard, Loeb (Harvard University Press)		2011	4/5 vol	
<i>Archives Binet</i>	UMR 7117					
<i>Archives Poincaré</i>		Basel /Boston/ Berlin : Birk-häuser	dir	1996-...	7 vol	multilingue
<i>Aristofanes, Tesmoforiazuse</i>	UMR 8061	Carocci, Roma	Rosella Saetta Cottone aut	à paraître		
<i>Aristotle's Metaphysics Beta. Symposium Aristotelicum</i>	UMR 8061, 8163	Oxford University Press	Michel Crubellier & André Laks (eds.)	2009		anglais
<i>Athalie, tragédie de Jean Racine, intermèdes de Jean-Baptiste Moreau,</i>	UMR 9912	Société française de Musicologie	éd. Anne Piéjus	2005		Cette édition présente pour la première fois le texte déclamé, conservé en orthographe ancienne, et l'intégralité de la musique établie d'après les sources contemporaines de la création de l'oeuvre, ainsi que de nouveaux intermèdes, anonymes, composés d'après les originaux vers 1740.
<i>base de données ROMANE</i>	UMR 6223	<a href="http://www.edi.mshs.univ-poitiers.fr/romane/">http://www.edi.mshs.univ-poitiers.fr/romane/</a>			site	a pour objectif de permettre la consultation du fonds iconographique d'art roman du CESC
<i>base générale TITULUS</i>	UMR 6223					Base de données (logiciel 4D) correspondant aux fascicules parus ; fichiers thématiques informatisés (formules, iconographie, toponymie, anthroponymie, métiers, Bible...)

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Beit-Arié M., Sirat C., Glatzer M., eds., Codices hebraicis litteris exarati quo tempore scripti fuerint exhibentes. Tome IV, de 1144 à 1200, Turnhout, Brepols, 2006 (Monumenta Palaeographica Medii Aevi, Series Hebraica, 5).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Bernardin de Saint-Pierre, Études de la nature</i>	UMR 5037	Publications de l'université de Saint-Étienne	Duflo, Colas (éd.),	2007		
<i>Bibliographia serliana: catalogue des éditions imprimées des livres du traité d'architecture de</i>	UMR 8137	picard	Vène, Magali aut	2007		
<i>Bibliographie Annuelle du Moyen Âge Tardif</i>	UPR 841					
<i>Bibliographie Atour de Rousseau</i> <a href="http://rousseauastudies.free.fr">http://rousseauastudies.free.fr</a> .	UMR 8599				<a href="http://rousseauastudies.free.fr/">http://rousseauastudies.free.fr/</a>	
<i>Bibliographie de la littérature de voyages à l'âge classique</i>	UMR 8599				site du CRLV	
BIBLIOGRAPHIE DE LA PHILOSOPHIE / BIBLIOGRAPHY OF PHILOSOPHY	UMR 8547			1937	papier + num + site	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Bibliographie du dix-neuvième siècle. Année 2006.</i>	UMR LIRE	Presses Sorbonne Nouvelle	Stéphanie Dord-Crouslé - Dominique Pety - Philippe Régnier.	2009	<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article428">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article428</a>	
<i>Bibliographie platonicienne</i>	UPR 76	Verlag	Luc Brisson	1959	papier	multilingue
<i>Bibliographie platonicienne</i>	UPR 76		Luc Brisson, avec la collaboration de Frédéric Plin		<a href="http://upr_76.vjf.cnrs.fr/biblioplato.html">http://upr_76.vjf.cnrs.fr/biblioplato.html</a> et <a href="http://www.platosociety.org/newbibliography.html">http://www.platosociety.org/newbibliography.html</a>	
<i>BN-OPALINE</i>						catalogue des manuscrits musicaux antérieurs à 1800 <a href="http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article134">http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article134</a>
<i>Borée</i>						<i>catalogue informatisé du fonds documentaire Rameau, bibliographie générale, sources d'archives</i> <a href="http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article102">http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article102</a>
<i>Buffon et l'histoire naturelle: l'édition en ligne</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.buffon.cnrs.fr/">http://www.buffon.cnrs.fr/</a>	
<i>Cadmus &amp; Hermione de Jean-Baptiste Lully et Philippe Quinault</i>	UMR 2162	Mardaga	Jean DURON	2008		Livret, études et commentaires
<i>Catalogue des éditions françaises de Mozart, 1764-1825</i>	UMR 2162	Olms	Jean GRIBENSKI aut	2006		
<i>Catalogue des manuscrits médiévaux de la bibliothèque municipale d'Orléans</i>	IRHT	cnrs	dir	à paraître	<a href="http://www.irht.cnrs.fr/publications/der78-orleans">http://www.irht.cnrs.fr/publications/der78-orleans</a>	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Catalogues des manuscrits en caractères hébreux conservés dans les bibliothèques de France I et II</i>	IRHT	brepols	Bobichon P et DUKAN M	2008		
<i>CD édités en partenariat avec le CMBV</i>	UMR 2162				34	
<i>Centre de ressources numériques « Telma »</i>	IRHT	<a href="http://www.cn-telma.fr/">http://www.cn-telma.fr/</a>	ed	2006	15 publications	centre de ressources numériques porté par l'École nationale des chartes et l'Institut de recherche et d'histoire des textes
<i>Christian Wolff et la pensée encyclopédique européenne : autour du « Discours préliminaire sur la philosophie en général »</i>	UMR 5037	Presses universitaires de Bordeaux	Goubet, Jean-François, Fabbianelli, Faustino et Rudolph, Olivier-Pierre	2008		
<i>Chronopéra</i>					<a href="http://chronopera.free.fr/">http://chronopera.free.fr/</a>	<i>Chronopéra</i> présente le programme de l'Opéra de Paris de 1749 à 1989 <a href="http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article106">http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article106</a>
<i>Claude Debussy et le prix de Rome</i>	UMR 200		Denis Herlin et Alexandre Dratwicki (éd.)			
<i>Companion to the Affective Sciences</i>	Jean Nicod	Oxford : Oxford University Press		paru ?		
<i>Copernic, le De revolutionibus orbium coelestium (1543)</i>	UMR SYRTE					Il s'agit de la première traduction française intégrale ed.bilingue

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Corpus de Philosophie des mathématiques 1499-1701</i>	UMR 7219	site cnrs	dir		<a href="http://www.reh-seis.cnrs.fr/spip.php?article618">http://www.reh-seis.cnrs.fr/spip.php?article618</a>	multilingue – livrer le matériau d'une histoire spécifique de philosophie des mathématiques, qui n'apparaît pas toujours très clairement dans le corpus ordinaire de l'historien des mathématiques ou de l'historien de la philosophie
<i>Correspondance de la famille Du Guet : Paris, Montbrison, Trévise, 1683-1750: une famille forézienne sous l'Ancien Régime</i>	UMR 5037	Publications de l'université de Saint-Étienne		2006	papier	fr
<i>Correspondance de Pierre Bayle, édition critique</i>	UMR 8137	Oxford, The Voltaire Foundation	Elisabeth Labrousse et d'Antony McKenna (dir)	4 volumes parus entre 2005 et 2009		
<i>Correspondance générale d'Édouard Charton (1824-1890)</i>	UMR LIRE	Champion	Éditée par Marie-Laure Aurenche	2008		<a href="http://lire-ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article386">http://lire-ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article386</a>
<i>Correspondance générale de La Beaumelle</i>	UMR 5186		ed.			
<i>Cours de psychologie de 1892-1893 au lycée Henri-IV</i>	UPR 76	in Anecdota	Sylvain Matton ed	2008		
<i>Criminocorpus. Le portail sur l'histoire de la justice, des crimes et des peines</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.criminocorpus.cnrs.fr/">http://www.criminocorpus.cnrs.fr/</a>	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Dedekind, Friedrich, Grobrianus : petit cours de muflerie appliquée pour goujats débutants ou confirmés, (texte latin traduit et commenté),</i>	UMR 8137	Les Belles Lettres	Vigliano, Tristan (éd.),	2006		trad. Fr
<i>Dictionary of Seventeenth-Century French Philosophers</i>	UMR 8137	Bristol, New York, Thoemmas,	McKenna, Antony (Assistant editor),	2008		anglais
<i>Dictionary of Seventeenth-Century French Philosophers</i>	UMR 8036	Continuum International Publishing Group Ltd.	Luc Foisneau	2008		
<i>Dictionnaire critique de la République</i>	UMR 8558	flammarion	Christophe Prochasson et Vincent Duclert (dir.)	2007	papier	
<i>Dictionnaire d'esthétique et de Philosophie de l'art</i>	UMR 6059	A. Colin	MORIZOT Jacques dir	2007		fr, trad bulgare 2008
<i>Dictionnaire de l'Allemagne (M. Espagne)</i>	UMR 8547					
<i>Dictionnaire de l'Antiquité</i>	UMR 8061	PUF	aut	2005		
<i>Dictionnaire des faits religieux</i>	UMR 8061	puf	Laks aut	à paraître		
<i>Dictionnaire des femmes de l'Ancienne France</i>	UMR 8137	numérique	Viennot, Éliane, (dir. secteur XVI siècle),	2000-	[ <a href="http://www.siefar.org/DicoAc.html">http://www.siefar.org/DicoAc.html</a> ].	
<i>Dictionnaire des femmes de l'Ancienne France</i>	UMR 8137		Viennot, E. (dir. secteur XVI siècle)	2000-	<a href="http://www.siefar.org/DicoAc.html">http://www.siefar.org/DicoAc.html</a>	

<b>Titre de l'ouvrage</b>	<b>Labo</b>	<b>Édition actuelle</b>	<b>Participation</b>	<b>Date 1<sup>re</sup> publication</b>	<b>Support</b>	<b>Spécificités</b>
<i>Dictionnaire des Philosophes antiques</i>	UPR 76	PUF	Richard Goulet].	1989 + 2 derniers vol à paraître en 2011		
<i>Dictionnaire des Sciences Humaines</i>	Jean Nicod	puf		paru?		
<i>Dictionnaire des synonymes</i>	UMR 5037	Vrin	Bertrand, Aliénor et Abramovici, Jean-Christophe (dir.),	paru?	papier	fr
<i>Dictionnaire électronique Montesquieu</i>	UMR 8137	ens lsh	Larrère, Catherine et Volpilhac-Auger, Catherine (dir.),	2008-	<a href="http://dictionnaire-montesquieu.ens-lsh.fr">http://dictionnaire-montesquieu.ens-lsh.fr</a> .	
<i>Dictionnaire génétique</i>	ITEM		dir	à paraître		
<i>Dictionnaire historique du Japon</i>	USSR 3331	ebisu		1995	papier	fr
<i>Dictionnaire mybologique (BDD)</i>	UMR 5186					
<i>Diderot, Denis La Religieuse, édition critique avec dossier</i>	UMR 8137	GF	Lotterie, Florence (éd),	2009		
<i>Diderot, Denis, Pensées sur l'interprétation de la nature</i>	UMR 5037	flammarion	Duflo, Colas (éd.),	2005		
<i>Diderot, Entretiens sur Le Fils naturel, De la poésie dramatique, Paradoxe sur le comédien</i>	UMR 5037	GF	Goldzink, J. (éd.),	2005		

<b>Titre de l'ouvrage</b>	<b>Labo</b>	<b>Édition actuelle</b>	<b>Participation</b>	<b>Date 1<sup>re</sup> publication</b>	<b>Support</b>	<b>Spécificités</b>
<i>Diderot, Le Fils naturel, Le Père de famille, Est-il bon ? Est-il méchant ?</i>	UMR 5037	GF	Goldzink, J. (éd.),	2005		
<i>Diogène d'Apollonie</i>	UMR 8061	Academia Verlag	André Laks	2008		Édition, traduction et commentaire des fragments et des témoignages
<i>DVD de l'édition électronique des Pensées de Pascal (réalisation Gilles Proust</i>	UMR 8137	numérique	Descotes, Dominique			ed. numérique
<i>Écrits sur la littérature de Mme de Staël</i>	UMR 5037	Librairie générale française	dir ed.	2006	papier	fr
<i>Édition électronique des Œuvres complètes de Pierre Bayle : collaboration à l'édition dirigée par Claude Blum</i>	UMR 8137	Éditions Garnier Electronique		2010		ed. numérique
<i>éditions musicales monumentales : Debussy (18 publications)</i>	UMR 200		dir			
<i>éditions musicales monumentales : Lully</i>	UMR 200		dir			
<i>éditions musicales monumentales : Rameau (2 publications)</i>	UMR 200		dir			
<i>Encyclopedia of the Classical Tradition</i>	UMR 8061	Harvard University Press.	Laks aut	à paraître		

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Encyclopédie du Rêve de d'Alembert de Diderot</i>	UMR 5037	cnrs ed	Duflo, Colas, Audidière, Sophie et Bourdin, Jean-Claude (dir.),	2006		
<i>Épicure, Lettre à Ménécée</i>	UMR 8137	GF	Morel, Pierre-Marie (éd.),	2009		trad fr
<i>Ermenrich d'Ellwangen, Lettre à Grimald, éd. et trad. M. GOULLET, Paris, 2008, 264 p. (SHM 37)</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Esther, tragédie de Jean Racine, intermèdes de Jean-Baptiste Moreau,</i>	UMR 9912	Société française de Musicologie	éd. Anne Piéjus	2003		Cette édition présente pour la première fois le texte déclamé, conservé en orthographe ancienne, et l'intégralité de la musique établie d'après les sources contemporaines de la création de l'oeuvre. Avant-propos bilingue français-anglais, 12 fac similés, gravure musicale sur logiciel /Berlioz/.
<i>Étienne Moulinié</i>	UMR 2162	CMBV	dir			Éditions critiques de l'oeuvre d'un compositeur
<i>Euterpe, la musique en images</i>						Euterpe invite à découvrir la musique dans les oeuvres d'art en Occident à partir du XII <sup>e</sup> siècle. <a href="http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article135">http://www.irpmf.cnrs.fr/spip.php?article135</a>
<i>Femmes poètes du XIX<sup>e</sup> siècle Une anthologie</i>	UMR LIRE	PUL	Christine Planté dir	1988 reed 2010		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article462">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article462</a>

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Fichier général des inscriptions médiévales françaises du VIII<sup>e</sup> siècle à 1500 (25 000 fiches classées par département puis ordre alphabétique de localités)</i>	UMR 6223			en cours		
<i>Fonds photographique du Corpus des inscriptions de la France médiévale (près de 6 000 clichés en noir et blanc)</i>	UMR 6223				papier + numérique + diapos	
<i>Fonds Raymond Aron. Inventaire</i>	UMR 8036		Elisabeth Dutartre	2007		
<i>GEHIN P., Les manuscrits grecs datés des XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles conservés dans les bibliothèques municipales de France, t. II, XIV<sup>e</sup> siècle (première moitié), Turnhout, Brepols, 2005 (Monumenta Palaeographica Medii Aevi, Series Graeca, 1)</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Grammaire française, 1566; suivie de Briefve</i>	UMR 5037	H. Champion	Hébert, Brigitte (trad.), Du Vivier (De Vivre), Gérard	2006		

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Grand dictionnaire de la philosophie</i>	UMR 7656, 8061 aut	Larousse-CNRS Éditions		2003	papier	
<i>Henri Du Mont</i>	UMR 2162	CMBV	dir	2000		Éditions critiques de l'œuvre d'un compositeur
<i>Henry Desmarest</i>	UMR 2162	CMBV	dir			Éditions critiques de l'œuvre d'un compositeur
<i>Hériman de Tournai, Les Miracles de sainte Marie de Laon, éd. et trad. A. SAINT-DENIS, Paris, 2008, 306 p. (SHM 36)</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Histoire de l'opéra italien en France (1752-1815)</i>	UMR 200	CNRS	Andrea Fabiano aut			
<i>In Principio – Incipitaire de textes latins</i>	IRHT		ed			
<i>Index de L'Heptaméron de Marguerite de Navarre : édition M. François, classiques Garnier, 1996 : prologue et appendices inclus</i>	UMR 5037	Presses universitaires Blaise Pascal	Demerson, Guy et Proust, Gilles	2005	papier	fr
<i>institution de la langue française expliquée en aleman, 1568</i>	UMR 5037					
<i>Inventaire des manuscrits philosophiques clandestins</i>	UMR 8599	inédit?				
<i>Jean-Philippe Rameau : Catalogue thématique des œuvres musicales, t. 1.</i>	UMR 200	CNRS éditions	Sylvie Bouissou et Denis Herlin dir			

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Jonas. Répertoire des textes et manuscrits médiévaux en langue d'oc et d'oïl</i>	UPR 841, IRHT	<a href="http://jonas.irht.cnrs.fr/accueil/accueil.php">http://jonas.irht.cnrs.fr/accueil/accueil.php</a>	dir	2009	Aedilis	
<i>Jules Michelet, Bible de l'humanité</i>	UMR LIRE	Champion	Édition critique établie par Laudyce Rézat	2009		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article448">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article448</a>
<i>KISSELEVA L., STIRNEMANN P., Catalogue des manuscrits médiévaux en écriture latine de la Bibliothèque de l'Académie des sciences de Russie de Saint-Petersbourg, Paris, 2005, 189 p. (DER 73).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>KÜHLMANN W., HARTMANN V. UND EL KHOLI S., Die deutschen Humanisten. Dokumente zur Überlieferung der antiken und mittelalterlichen Literatur in der frühen Neuzeit. Abteilung 1 Die Kurpfalz. Band I/1, I/2, Turnhout, 2005, 1222 p.</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>L. Wittgenstein, Fiches</i>	UMR 6059					
<i>L. Wittgenstein, Philosophica IV</i>	UMR 6059					
<i>L. Wittgenstein, Recherches philosophiques</i>	UMR 6059					

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>L'édition électronique des Œuvres de Lavoisier</i>	Centre A. Koyré					<a href="http://www.lavoisier.science.gouv.fr/">http://www.lavoisier.science.gouv.fr/</a>
<i>L'Œuvre de Sébastien de Brossard (1655-1730), catalogue thématique</i>	UMR 2162	CMBV/Klincksieck	Jean DURON aut	1996		
<i>La conduite de l'isolé et deux autres épîtres</i>	UPR 76		Charles Genequand	2010		traduction et commentaire
<i>La correspondance de Binet</i>	UMR 7117					
<i>La France et les Français</i>	UMR 5186					
<i>La Grande Grammaire du Français</i>	Jean Nicod	bayard	aut	paru?		
<i>La matière et les choses. Le livre IV des Météorologiques d'Aristote</i>	UMR 8061	vrin	Cristina Viano	2006		trad. + présentation
<i>La Misère, de Louise Michel et Marguerite Tynayre</i>	UMR LIRE	PUL	Texte présenté par Xavière Gauthier et Daniel Armogathe	2006		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article210">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article210</a>
<i>La Religieuse en chemise et le Cochon mitré</i>	UMR LIRE	PUSE	Jean Sgard	2009		
<i>La signification et l'enseignement. Texte latin, traduction française et commentaire du « De magistro » de saint Augustin</i>	UPR 76	vrin	Emmanuel Bermon	2007		
<i>L'Amant jaloux d'André Ernest Modeste Grétry et Thomas d'Hèle</i>	UMR 2162	Mardaga	Jean DURON aut	2010		Livret, études et commentaires

<b>Titre de l'ouvrage</b>	<b>Labo</b>	<b>Édition actuelle</b>	<b>Participation</b>	<b>Date 1<sup>re</sup> publication</b>	<b>Support</b>	<b>Spécificités</b>
<i>L'Année philologique</i>	UPR 76					
<i>Le lexique métalittéraire français : xv<sup>e</sup>-xvii<sup>e</sup> siècles</i>	UMR 5037	Droz	Jourde, Michel et Monferran, Jean-Charles (dir.),	2006		
<i>Le Livre de la rhétorique du philosophe et médecin Ibn Tumlus (Albagiag bin Thalmus)</i>	UPR 76	vrin	Maroun Aouad (édit.),	2006		Introduction générale, édition critique du texte arabe, traduction française et tables
<i>Le Livre de l'art du combat : commentaires et exemples : édition critique du Royal Armouries MS. I.33 par F. CINATO et A. SURPRENANT, Paris, 2009, XCIV-359 p. (SHM 39).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Le livre des vingt-quatre philosophes. Résurgence d'un texte du IV<sup>e</sup> siècle</i>	UPR 76	vrin	F. Hudry	2009		Introduction, texte latin, traduction et annotation
<i>Le livre nommé Le Canarien. Textes français de la conquête des Canaries au xv<sup>e</sup> siècle, éd. E. AZNAR, D. CORBELLA, B. PICO, M. PRIVAT, A. TEJERA, Paris, 2008, 296 p. (SHM 38)</i>	IRHT	CNRS ed				

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Le Prince chrétien. Aspects de la pensée espagnole du Siècle d'Or. Antbologie et présentation de textes préparées par le Groupe de travail sur la Philosophie espagnole classique au sein du CERPHI</i>	UMR 8137	L'Harmattan	Mestre Zaragozá, Marina (dir.),	2005		
<i>Le Registre de Lambert, évêque d'Arras (1093-1115), éd. et trad. C. GIORDA-NENGO, Paris, 2007, 528 p. (SHM 34)</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Le Vocabulaire Européen des philosophies</i>	UMR 8061					fr, trad.
<i>LEFEVRE S. sous la direction de FOSSIER L., Recueil d'actes de Saint-Lazare de Paris : 1124-1254, Paris, 2005, 317 p. (DER 75).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Léon l'Hébreu, Dialogues d'amour</i>	UMR 5037	vrin	Dagron, Tristan et Ansaldi, Saverio (éd.),	2006	papier	fr
<i>Les «Éclaircissements» de Pierre Bayle</i>	UMR 8137	H. Champion	McKenna, Antony et Bost, Hubert (dir.),	2009		
<i>Les deux sources de la morale et de la religion / Henri Bergson</i>	UMR 8137	Presses universitaires de France	Frédéric Worms (dir.),	2008		

<b>Titre de l'ouvrage</b>	<b>Labo</b>	<b>Édition actuelle</b>	<b>Participation</b>	<b>Date 1<sup>re</sup> publication</b>	<b>Support</b>	<b>Spécificités</b>
<i>Les Gazettes européennes de langue française. Répertoire</i>	UMR LIRE	BNF	par Pierre Rétat	2002		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article338">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article338</a>
<i>Les grandes conférences du Centenaire</i>	UMR 8547	<a href="http://www.sofrphilolo.fr/?idPage=34">http://www.sofrphilolo.fr/?idPage=34</a>		2001	num	
<i>Les instruments du calcul savant</i>	UMR 7219	site avec publications, ressources...	Responsable scientifique : Dominique TOURNÈS	2003	<a href="http://www.reunion.iufm.fr/dep/mathematiques/calculsavant/index.html">http://www.reunion.iufm.fr/dep/mathematiques/calculsavant/index.html</a>	multilingue - mettre en lumière des savoirs et des pratiques mathématiques négligés par l'historiographie traditionnelle, ainsi que des interactions jusqu'ici peu étudiées entre diverses communautés professionnelles (mathématiciens, ingénieurs, fabricants d'instruments...).
<i>Les manuscrits de philosophie en langue arabe conservés dans les bibliothèques du Liban – Protocole – Catalogue raisonné des manuscrits de philosophie en langue arabe de la Bibliothèque Saint-Paul de Harissa (première partie)</i>	UPR 76	in Mélanges de l'Unversité Saint-Joseph, 61		2008		
<i>Les mots des diasporas</i>	UMR 8036	resses Universitaires du Mirail	Chantal Bordes-Benayoun et Dominique Schnapper	2008		
<i>Les périodiques savants dans l'Europe des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.histnet.cnrs.fr/research/periodiques-savants/">http://www.histnet.cnrs.fr/research/periodiques-savants/</a>	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Les relations franco-anglaises aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles : périodiques et manuscrits clandestins</i>	UMR 5037	Presses de l'Université Paris-Sorbonne	Artigas-Menant, Geneviève, Jaffro, Laurent et McKenna, Antony (dir.).	2007	papier	
<i>Les Sentences de Porphyre</i>	UPR 76		UPR 76 L. Brisson dir	2005		Études d'introduction, texte grec et trad. française, commentaire + trad anglaise par John Dillon
<i>Lexicon. Mise en page et mise en texte des manuscrits hébreux, grecs et latin</i>	IRHT	<a href="http://aedilis.irht.cnrs.fr/lexicon/">http://aedilis.irht.cnrs.fr/lexicon/</a>		2009	Aedilis	outil
<i>L'explication de textes en langues anciennes</i>	UMR 5037	Ellipses	Julie Sorba (dir.),			
<i>Lire les stoïciens</i>	UMR 8061	puf	dir + aut	2009		outil
<i>Litterae Papales – Les lettres pontificales. Ut per litteras Apostolicas</i>	IRHT		ed		dvd	version électronique des Registres et lettres des Papes du xiii <sup>e</sup> siècle (32 volumes, Rome, 1883 et sq.) et Registres et lettres des Papes du xiv <sup>e</sup> siècle (48 volumes, Rome, 1899 et sq.)
<i>M.U.S.E</i>	UMR 8132					
<i>Maguelone (BDD)</i>	UMR 5186					
<i>Malebranche, Nicolas de, De la recherche de la vérité. Livre II. partie II, De l'imagination. partie III, De la communication contagieuse des imaginations fortes</i>	UMR 8137	flammarion	Pellegrin, Marie-Frédérique (éd.),	2006		

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Marc-Antoine Charpentier</i>	UMR 2162	CMBV	dir	1997		Éditions critiques de l'œuvre d'un compositeur
<i>Mémoires secrets (dits de Bachaumont) pour servir à l'histoire de la République des Lettres en France, depuis 1762 jusqu'à nos jours</i>	UMR LIRE	Édition critique. Sous la direction de Christophe Cave et Suzanne Cornand	Champion	2009		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article446">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article446</a>
<i>Meyerhold, écrits sur le théâtre (éd. Béatrice Picon-Vallin) 2009</i>	ARIAS					
<i>Milton, John, Doctrine et discipline du divorce</i>	UMR 8137	belin	Tournu, Christophe (dir. et trad.),	2005		
<i>Montaigne, Les Essais, nouvelle éd. De l'exemplaire de Bordeaux</i>	UMR 8137	gallimard	Naya, Emmanuel, Reguig-Naya, D. et Tarrête, A. (éd.),	2009		trad fr
<i>Montesquieu, Considérations sur les causes de la grandeur des Romains et de leur décadence ; suivi de Réflexions sur la monarchie universelle en Europe</i>	UMR 8137	gallimard	Volpillac-Auger, Catherine (dir.),	2008		
<i>Montesquieu, Lettres persanes</i>	UMR 8137	Librairie générale française	Vernière, Paul et Volpillac-Auger, Catherine (dir.),	?2 vol : 2005 et 2006		
<i>Montesquieu, Oeuvres complètes. 9, Oeuvres et écrits divers. II,</i>	UMR 8137	Oxford, Voltaire Foundation,	Société Montesquieu et Pierre Rézat (dir.),	2006		

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Monumenta Paleographica Medii Aevi, series graeca, series hebraica (Brepols)</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Musique, esthétique et société en France au XIX<sup>e</sup> siècle</i>	UMR 200	Mardaga	Florence Gétreau (dir.),			
<i>Nach englischer und frantzösischer Art.</i>		brepols	Aurelio Bianco	2010		ed. 5 vol + présentation <a href="http://ricercar.cesr.univ-tours.fr/2-publications/032211.asp?numpubli=476">http://ricercar.cesr.univ-tours.fr/2-publications/032211.asp?numpubli=476</a>
<i>Œuvre poétique complète de Léopold Sedar Senghor. Édition critique</i>	ITEM	cnrs ed	dir			
<i>Œuvres complètes de Bergson</i>	UMR 6059	GF	dir PA Miquel	5 premiers vol en 2011		
<i>Œuvres complètes de Binet</i>	UMP 7117					
<i>Œuvres complètes de d'Alembert</i>	GDR 2838, UMR 5186	Cnrs éditions	initiateur	2002	papier	fr
<i>Œuvres complètes de Debussy</i>	UMR 200	Éditions Durand		1988	34 volumes répartis en 6 séries	
<i>Œuvres complètes de Diderot</i>	UMR 8599	Hermann	dir	33 tomes depuis 1975	papier	fr
<i>Œuvres complètes de Fauré</i>	UMR 200	Éditions Bärenreiter		2010	29 volumes répartis en 7 séries	fr
<i>Œuvres complètes de Lesage</i>	UMR 8599	Champion		2009	1 vol paru	
<i>Œuvres complètes de Molière</i>	UMR 200	Pléiade, 2vol.	Anne Piéjus (co-éd),			trad fr?
<i>Œuvres de Mercier</i>	UMR 8599	Mercure de France		1986	papier	

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Œuvres de Plotin</i>	UPR 76	gf	dir. : L. Brisson et J.-F. Pradeau	2005 5 vol parus		
<i>Œuvres et rayonnement de Jean-Baptiste Lamarck</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.lamarck.cnrs.fr/">http://www.lamarck.cnrs.fr/</a>	
OLIVIER J.-M., MONEGIER DU SORBIER M.-A., <i>Manuscrits grecs récemment découverts en République Tchèque: supplément au Catalogue des manuscrits grecs de Tchécoslovaquie, Paris, 2006, 466 p. (DER 76).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Opera omnia Rameau</i>	UMR 200	Société Jean-Philippe Rameau		1996	76 volumes répartis en 6 séries	
<i>Oxford Handbook of Contemporary Analytic Philosophy</i>	Jean Nicod	Oxford : Oxford University Press		2005		
<i>Patrimoine musical régional</i>	UMR 200	variable		1989	30 publications	
<i>Philosophie des sciences</i>	IHPST					

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Pierre Bayle, Correspondance, édition électronique en cours de publication sur le site de la Fondation Voltaire (au sein du projet "Lumières électroniques") et sur le site de l'UJMSE</i>	UMR 8137		McKenna, Antony (dir.),	2010		
<i>Pierre I et Robert III Ballard, imprimeurs du roy pour la musique (1599-1673)</i>	UMR 2162	Mardaga	Laurent GUILLO aut	2003	2 vol	recense et décrit les 650 éditions publiées par cet atelier durant les directions de Pierre I puis de Robert III Ballard
<i>Pierre qui roule, de George Sand</i>	UMR LIRE	éditions Paradigme	Édition critique d'Olivier Bara	2008		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article357">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article357</a>
<i>Psychologies du raisonnement</i>	Jean Nicod	De Boeck		2008		
<i>Raymond de Marseille, Opera omnia. T. I, Traité de l'astrolabe et Liber cursuum planetarum, éd. et trad. M.-T. D'ALVERNY O, BURNETT C., POULLE E., à paraître en novembre 2009.</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Raymond de Marseille, Opera Omnia. Traité de l'astrolabe</i>	IRHT	cnrs	dir	2009	1/2 vol	
<i>Reliures Médiévales des Bibliothèques de France</i>	IRHT	Brepols				

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Répertoire bibliographique des textes philosophiques de l'Antiquité</i>	UPR 76					
<i>Répertoire bibliographique des textes philosophiques de l'Antiquité</i>	UPR 76	numérique	Martine Vidoni,		<a href="http://rspa.vjf.cnrs.fr/">http://rspa.vjf.cnrs.fr/</a>	
<i>Répertoire des chercheuses et chercheurs du domaine « Femmes Ancien Régime »,</i>	UMR 8137		Viennot, Éliane		[ <a href="http://www.siefar.org/RepA-Z.html">http://www.siefar.org/RepA-Z.html</a> ].	BDD
<i>Reprint des Oeuvres de Francesco Cattani da Diacceto, Opera omnia</i>	CESR	ed du miraval	dir	2009		Reprint avec introduction et bibliographie des Oeuvres de Francesco Cattani da Diacceto <a href="http://cesr.univ-tours.fr/73942126/0/fiche___document/&amp;RH=1201451179667">http://cesr.univ-tours.fr/73942126/0/fiche___document/&amp;RH=1201451179667</a>
<i>Réseau européen pour l'histoire des cartes géologiques</i>	Centre A. Koyré				<a href="http://www.hstl.crhst.cnrs.fr/i-corpus/histmap/">http://www.hstl.crhst.cnrs.fr/i-corpus/histmap/</a>	
<i>RHLF: un volume / an de Bibliographie préparé en collaboration avec la BNF</i>	UMR 8132	puf	dir	1894	papier + cairn	fr
<i>Rigord: Histoire de Philippe Auguste, éd. et trad. E. CARPENTIER, G. PON, Y. CHAUVIN, Paris, 2006, 493 p. (SHM 33).</i>	IRHT	CNRS ed				

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Sebastiano Serlio (1537 - 1681), Anne de France, Enseignements à sa fille, suivi de l'Histoire du siège de Brest</i>	UMR 8137	Publications de l'université de Saint-Étienne	Viennot, Éliane et Clavier, Tatiana (éd.),	2006		
<i>Sébastien de Brossard</i>	UMR 2162	CMBV	dir			Éditions critiques de l'œuvre d'un compositeur
<i>Sémantico-pédie: dictionnaire de sémantique</i>	Jean Nicod	cnrs		2006	<a href="http://www.semantique-gdr.net/dico/">http://www.semantique-gdr.net/dico/</a>	
<i>Sénèque, De brevitate vite, (traduction et commentaire),</i>	UMR 8137	Ellipses	Naya, E. (éd.),	2005		trad fr
<i>Sénèque, La brièveté de la vie,</i>	UMR 8137	Ellipses	Emmanuel Naya (trad.),	2006		
<i>Sequentia</i>	IRPMF				<a href="http://sequentia.irpmf-cnrs.fr/">http://sequentia.irpmf-cnrs.fr/</a>	outil de recherche destiné aux musicologues, musiciens, théologiens, historiens et littéraires intéressés par les domaines du chant <a href="http://www.irpmf-cnrs.fr/spip.php?article133ecclésiastique">http://www.irpmf-cnrs.fr/spip.php?article133ecclésiastique</a> (ou par son lien avec la musique), de la liturgie et des textes néo-latins
<i>Shakespeare, la France et les français (BDD)</i>	UMR 5186					
<i>Shakespeare on screen</i>	UMR 5186		ed.			
<i>Sociétaires de l'Association des artistes musiciens</i>						Base de données des sociétaires de l'Association des artistes musiciens (1844-1861). <a href="http://www.irpmf-cnrs.fr/spip.php?article235">http://www.irpmf-cnrs.fr/spip.php?article235</a>
<i>Spinoza, Oeuvres. V, Tractatus politicus = Traité politique</i>	UMR 8137	PUF	Moreau, Pierre-François (dir.),	2005		trad fr

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Spinoza. Oeuvres. 1, Premiers écrits [Tractatus de intellectus emendatione = Traité de la réforme de l'entendement/ Korte Verhandeling = Court Traité</i>	UMR 8137	PUF	Moreau, Pierre-François (dir.),	2009		trad fr
<i>Stevin, Simon, Simon Stevin : De la vie civile, 1590, Catherine Secretan (trad.)</i>	UMR 8137	ens	Secretan, Catherine et Boer, Pim d. (dir.),	2005		
<i>Textes-Clef en Philosophie de la Logique</i>	Jean Nicod	vrin		2008		
<i>Textos en diáspora. Una antología sobre afrodescendientes en América</i>	USR 3337		dir CEMCA			
<i>The Cambridge handbook of cognitive science</i>	Jean Nicod	Cambridge : Cambridge University Press		paru ?		
<i>The Oxford Companion to Consciousness</i>	Jean Nicod	Oxford : Oxford University Press.		paru ?		
<i>The Pragmatics Encyclopedia</i>	Jean Nicod	London : Routledge		paru ?		
<i>Théodore Jouffroy, Cours de 1830 à l'École normale. Suivi de Du Suicide</i>	UPR 76	in Anecdota	Sylvain Matton ed	2007		
<i>Théophile de Viau : oeuvres poétiques</i>	UMR 8137	atlante	Rosellini, Michèle et Caron, Philippe	2009		

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>THOMAS BRADWAR-DINE, Traité des rapports entre les rapidités dans les mouvements, suivi de, NICOLE ORESME, Sur les rapports de rapports</i>	CESR	les belles lettres	Sabine Rommevaux	2010		Introduction, traduction et commentaires <a href="http://cesr.univ-tours.fr/40773273/0/fiche___document/&amp;RH=1201451179667">http://cesr.univ-tours.fr/40773273/0/fiche___document/&amp;RH=1201451179667</a>
<i>Thomas-Simon Gueullette, Contes</i>	UMR LIRE	H. Champion	Jean-François Perrin dir	3 vol 2010		<a href="http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article461">http://lire.ish-lyon.cnrs.fr/spip.php?article461</a>
<i>Tiercelin, C. et Thibaud, P. (eds.), (2006). Ecrits Logiques, volume 3 des Œuvres philosophiques de C. S. Peirce, Paris : éditions du Cerf.</i>	Jean Nicod					
<i>Vénus &amp; Adonis, tragédie en musique de Henry Desmarest (1697)</i>	UMR 2162	Mardaga	Jean DURON et Yves FER-RATON	2006		Livret, études et commentaires
<i>Vie de Christina de Markyate, éd. et trad. P. L'HERMITE-LECLERCQ et A.-M. LEGRAS, Paris, 2007, 250 + 336 p. (SHM 35).</i>	IRHT	CNRS ed				
<i>Vocabulaire de la musique baroque</i>	UMR 200	Minerve	Sylvie Bouissou			
<i>Vocabulaire de Paul Ricœur</i>	UMR 5037	Ellipses	Abel, Olivier et Porée, Jérôme aut.	2007	papier	fr

Titre de l'ouvrage	Labo	Édition actuelle	Participation	Date 1 <sup>re</sup> publication	Support	Spécificités
<i>Vocabulaire européen des philosophies. Dictionnaire des intraduisibles</i>	UMR 8061	Seuil-Le Robert	Barbara Cassin dir		papier + site	trad. en cours en ukrainien, russe, espagnol, anglais, arabe, persi + <a href="http://intraduisibles.org/">http://intraduisibles.org/</a>
<i>Vocabulaires de la voix</i>	UMR 8061		dir			
<i>Voir la musique, Les sujets musicaux dans les œuvres d'art du xv<sup>e</sup> au xx<sup>e</sup> siècle</i>	UMR 200		Florence Gétreau			
<i>Voltaire, Lettres philosophiques</i>	UMR 8137		McKenna, Antony et Ferret, Olivier (éd.)	paru ?		
<i>Wolff, Christian, Discours préliminaire sur la philosophie en général,</i>	UMR 8137	vrin	Jean-François Goubet, Th Arnaud, W. Feuerhahn et Jean-Marc Rohrbasser (trad.),	2008		trad

### ANNEXE 3

## L'ENGAGEMENT INTERNATIONAL DE LA SECTION 35, EXEMPLES

Le réseau international tissé par les unités de recherche de la section 35 est tout à fait impressionnant et devrait pouvoir répondre au souci de l'internationalisation de la recherche.

Pour ne citer que quelques exemples,

– l'UMR 8547 collabore avec l'Université de Montréal, participe à divers contrats ANR qui impliquent des collaborations internationales avec l'Université de Leipzig et à des programmes avec la Villa Vigoni (Italie), le Centre Marc Bloch

de Berlin et le Freiburger Institute for advanced studies. Elle est en lien avec les Archives Husserl de Fribourg et celles de Louvain. Elle a un réseau de collaboration avec les institutions suivantes : Université de Munich, Collegium Phaenomenologicum de Wuppertal, Archives Patocka de Prague, Centre de recherches phénoménologiques de l'Université de Liège, universités Saint-Louis à Bruxelles, Département de philosophie de la Sapienza à Rome, Université de Chicago et de Northwestern.

– L'UPR 841 travaille en collaboration avec l'Union académique internationale, la Bibliothèque du Vatican, la Bibliothèque royale de Belgique, le Huygens Institut, la Società Internazionale per lo Studio del Medioevo Latino, la

Bibliothèque nationale de Hongrie, l'Université de Rome, de Parme, de Chieti, de Naples, le Patriarcat eocuménique d'Istanbul, le patriarcat syro-catholique de Charfel au Liban, etc.

– L'Institut Jean-Nicod est pour sa part membre de plusieurs sociétés: la European Society for Analytic Philosophy, la European Society for Philosophy and Psychology, la Société de Philosophie Analytique, l'International Cognition and Culture Institute, le European Network of the Philosophers of Language, Semantics & Philosophy in Europe, Semantiknetzwerk, l'Association for the Scientific Study of Consciousness,

Consciousness. Il entretient aussi des relations privilégiées avec les universités de Lund, Nottingham, Barcelone, Londres, Berkeley, Leipzig, St Andrews, NYU Rutgers, Oslo, Stanford, Bochum, LSE, Macquarie, Bruxelles, Oxford, Genève, Amsterdam, Turin. A évoquer? question de stratégie

– L'UMR 5037 a développé un maillage de relations internationales extrêmement dense: Allemagne (6 collaborations), Belgique (1), Espagne (11), Royaume-Uni (7), Italie (13), Pays-Bas (5), Portugal (2), Suisse (3), États-Unis (11), Canada (5), Mexique (6), Afrique du Sud (2), Liban (3), Japon (2).

## SOCIOLOGIE, NORMES ET RÈGLES

*Président de la section*  
Philippe AUVERGNON

*Membres de la section*

Danièle CARRICABURU  
Annie COLLOVALD  
Lilian DE COSTER  
Carlos DEL CUETO  
Catherine DELCROIX  
Claude DIDRY  
Baudouin DUPRET  
Julien DUVAL  
Francette FINES  
Olivier GODECHOT  
Michel GROSSETTI  
Dominique GUILLO  
Jean-Louis HALPERIN  
Anne LEVADE  
Pierre MERLE  
Francis MESSNER  
Stéphanie MORANDEAU  
Frédéric NEYRAT  
Édouard VERNY  
Anne-Catherine WAGNER

### INTRODUCTION

Ce rapport est le produit d'une écriture collective associant membres de la section et chercheurs et ingénieurs d'étude représentants des communautés scientifiques concernées. La coordination finale a été réalisée par Philippe Auvergnon, Claude Didry, Olivier Godechot, Jean-Louis Halperin et Francis Messner.

Ont contribué à l'élaboration de ce rapport : Philippe Auvergnon, Danièle Carricaburu, Annie Collovald, Marie Cornu, Gautier Debruyne, Lilian De Coster, Catherine Delcroix, Carlos Del Cueto, Claude Didry, Baudouin Dupret, Julien Duval, Francette Fines, Olivier Godechot, Michel Grossetti, Dominique Guillo, Jean-Louis Halperin, Thierry Kirat, Anne Levade, Pierre Merle, Francis Messner, Stéphanie Morandea, Laurent Mucchielli, Frédéric Neyrat, Édouard Verny, Anne-Catherine Wagner.

Sont successivement proposés un état des lieux et quelques perspectives démographiques (I), les principales thématiques de recherche des chercheurs et unités relavent de la section (II), avant que ne soient indiqués, en conclusion, quelques éléments de prospective.

# 1 – ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES DÉMOGRAPHIQUES

Sont donnés plus avant quelques aperçus disciplinaires, thématiques et géographiques (1), l'analyse de la démographie des chercheurs (2) et des ingénieurs, techniciens et administratifs des UMR relevant à titre principal de la section 36 (3).

## 1.1 APERÇUS DISCIPLINAIRES, THÉMATIQUES ET GÉOGRAPHIQUES

La section 36 regroupe principalement, depuis le début des années 1990, la majeure partie des juristes du CNRS et une partie significative des sociologues. La sociologie du travail et des organisations a choisi de rejoindre la section 40, avec les politistes, tandis que la sociologie des religions se retrouve en section 38 (anthropologues). L'évolution de la science politique en France, avec l'émergence récente de la sociohistoire du politique et de la sociologie politique, a favorisé un rapprochement de la science politique et de la sociologie – à la différence de ce qui se passe aux États-Unis où la science politique s'est rapprochée de l'économie. Cette évolution a favorisé une certaine proximité entre la section 36 et la section 40 et se traduit par le nombre grandissant de candidats postulant dans les deux sections.

Le recensement, pour le bilan démographique, des chercheurs de la section 36 a permis de préciser sa composition démographique (cf. supra). En 2009, la section était constituée de 68% de sociologues et de 24% de juristes. On remarquera que la frontière tracée entre les deux groupes pour des commodités statistiques est en partie poreuse, en raison du développement de la sociologie du droit à l'interface des deux disciplines (approche adoptée par 11 chercheurs sur 250). Il existe une minorité de 7% de chercheurs qui

appartiennent à d'autres disciplines que la sociologie ou le droit : anthropologues (4%), politistes (2%), philosophes, démographes, psychanalystes.

Un codage par mots clés des chercheurs de la section met en évidence la grande diversité des thématiques. Outre la sociologie et le droit, qui arrivent en tête, les mots clés les plus utilisés sont les suivants : politique (21), santé (20), travail (19), histoire (19), genre (17), migration (14), culture (12), science (10), média (10), environnement (10), économie ou économique (10), jeune ou jeunesse (9), éducation (9), ville (8), famille (8).

Les affectations des chercheurs de la section 36 se concentrent essentiellement dans la région parisienne (69,7%). Cette concentration est anormalement élevée au regard de l'ensemble du CNRS (42%) et demeure plus élevée que pour l'ensemble des sections relevant de l'InSHS (65%). Elle est particulièrement marquée pour les sociologues (77,5%), nettement moins pour les juristes (46%). Cette situation est en décalage avec la répartition des enseignants chercheurs. Ainsi, si l'on prend pour base l'ensemble des personnels rattachés aux UMR de la section 36, la part de la région parisienne n'est que de 44%. Cela se traduit par des structures d'UMR très contrastées, avec un ratio de chercheurs de l'organisme bien plus élevé en région parisienne.

Si l'on se place dans la perspective des évolutions des 6 prochaines années, en comptant tous les départs théoriquement prévus d'ici 2016, la sociologie devrait connaître une décroissance beaucoup plus accentuée que le droit (départ de la moitié des effectifs contre seulement un peu plus du quart en droit). Les départs se feront de façon équilibrée entre Paris et les autres régions, mais dans la mesure où la sociologie est très fortement concentrée à Paris, on peut craindre la quasi-disparition des sociologues relevant de la section 36 dans de nombreuses régions. Lyon et Aix-Marseille sont les seuls pôles régionaux qui resteraient au-dessus de 2 chercheurs.

Fort de ce constat, il conviendrait d'éviter un repli de la sociologie fondamentale du CNRS

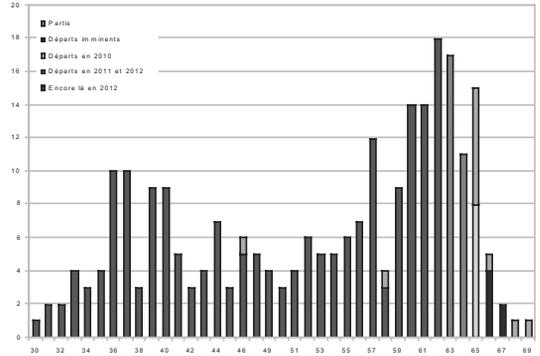
sur la seule région parisienne, dans une configuration de type EHESS, ce qui serait en contradiction avec l'évolution des effectifs d'enseignants chercheurs (pour lesquels la province est très largement majoritaire) et contraire aux intérêts généraux de la recherche en sociologie, qui a besoin d'une bonne articulation entre organisme de recherche et université.

## 1.2 DÉMOGRAPHIE DES CHERCHEURS

La section 36 connaît une situation démographique préoccupante depuis les années 2000. Le rapport de conjoncture de 2004 recensait 308 chercheurs en section 36 (probablement en 2002), nous en comptons en mai 2009, 253. En 7 ans l'effectif de la section a donc baissé de 17%. Loin de se résorber, ce phénomène va s'accélérer au cours des prochaines années avec le départ à la retraite des cohortes nombreuses recrutées à la fin des années 1970, notamment lors des vagues de titularisation et de résorption de l'emploi précaire. Entre mai et septembre, 12 personnes ont déjà quitté la section pour prendre en général leur retraite (un départ vers la section 40), 6 vont probablement le faire d'ici la fin de l'année 2009. En faisant l'hypothèse très stricte que l'on ne part à la retraite que dans l'année de ses 66 ans, on comptera encore 8 départs en 2010, 11 départs en 2011 et 17 départs en 2012, soit 54 départs (21 % des effectifs) d'ici la fin de la mandature. La mandature suivante 2012-2016 sera tout aussi douloureuse avec 55 départs à la retraite. En tout, 43 % des effectifs de la section 36 devrait partir à la retraite à un horizon de 7 ans.

Au cours des 3 prochaines années, ces départs massifs à la retraite touchent légèrement plus les femmes (23 % partent à la retraite) que les hommes (20 %) et bien évidemment plus les DR (26 %) que les CR (19 %). La région parisienne et les autres régions perdent à peu près autant de chercheurs (22 % pour la première, toutes délégations

**Graphique 1.** L'effectif par âge en octobre 2009.

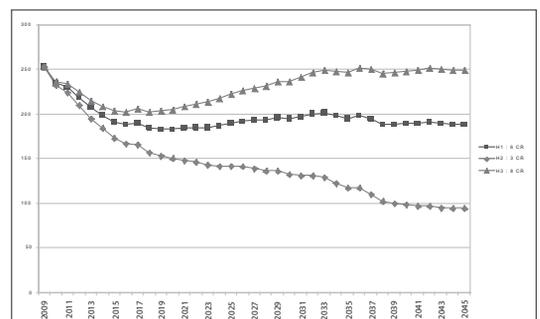


*Note de lecture :* Les chercheurs « partis » sont obtenus en comparant le fichier des membres de la section fourni le 1<sup>er</sup> octobre 2009 et celui fourni le 27 mai 2009 par le secrétariat administratif du comité. L'âge est calculé au 31 décembre 2009. Les 4 CR recrutés en 2009 ont été intégrés dans le fichier. On compte ainsi 5 personnes de 66 ans, dont une est partie entre mai et octobre et quatre quittant très prochainement la section.

confondues, 20 % pour les secondes) ; mais cette affaïssement est plus significatif dans certaines délégations ayant déjà très peu de chercheurs relevant de la section 36 (-60 % en Midi-Pyrénées, -50 % en Centre-Poitou-Charantes).

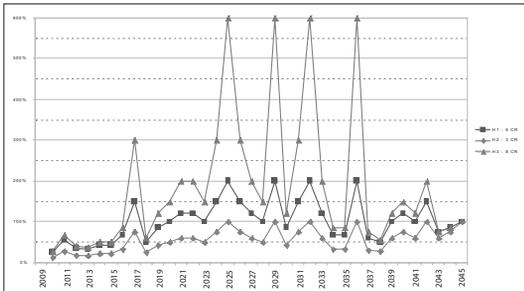
Dans les trois hypothèses, la section sera particulièrement affectée en 2016 par le choc démographique avec la perte de 25 % de ses effectifs dans l'hypothèse 1, de 33 % dans l'hypothèse 2 et de 20 % dans l'hypothèse 3.

**Graphique 2.** Évolution des effectifs à l'horizon 2045 selon 3 hypothèses de recrutement (H1 = 6 chercheurs/an ; H2 = 3 chercheurs /an ; H3 = 8 chercheurs/an)



Après 2016, les trajectoires selon les trois hypothèses divergent fortement. Recruter 6 CR par an permet de stabiliser l'effectif de la section autour de 190 membres. Recruter 8 CR par an permet de reconstituer le capital scientifique à l'horizon de 2030. Recruter 3 CR par an est une politique qui continue à fragiliser considérablement la section avec une baisse continue des effectifs et une stabilisation de l'effectif en 2045 aux alentours de 95 membres, effectif alors sans doute insuffisant pour continuer à fonctionner en section.

**Graphique 3.** Taux de remplacement annuel des départs à la retraite selon les hypothèses de recrutement



En termes de remplacement annuel des départs à la retraite, on observe qu'en 2016, en cumulant les départs et les arrivées, on aura remplacé 40% des départs à la retraite dans l'hypothèse 1, 20% des départs à la retraite dans l'hypothèse 2 et 45% des départs à la retraite dans l'hypothèse 3. Après 2016, l'option 1 compense bon an mal an les départs annuels à la retraite, l'option 2 les compense aux deux tiers et l'option 3 conduit à recruter deux fois plus que les départs à la retraite, ce qui permet de reconstituer le capital scientifique perdu entre 2009 et 2016.

**Pour résumer :** Une politique de recrutement de 8 CR par an, politique plausible et en phase avec l'offre de travail annuel des nouveaux docteurs en sociologie et en droit, sans conduire pour autant à abaisser le niveau de recrutement, est une politique qui permet de reconstituer le potentiel scientifique de la section une fois le choc démographique passé.

Une politique de recrutement de 6 CR par an stabilise l'effectif de la section une fois le choc démographique passé mais ne le résorbe pas. Une politique de recrutement de faible intensité de type 3 CR par an, comme celle conduite en 2009, entraînerait un déclin irrémédiable de la section 36.

### 1.3 DÉMOGRAPHIE DES ITA CNRS, DES BIATOSS ET CONTRACTUELS DES UNITÉS DE RECHERCHE RATTACHÉES À TITRE PRINCIPAL À LA SECTION 36

Afin d'éclairer les enjeux d'un affaiblissement ou d'un désengagement du CNRS vis-à-vis des UMR et des FRE, une attention particulière est portée à la catégorie des agents ITA du CNRS et, notamment, aux évolutions prévisibles de leurs effectifs. Sur ce point, les présents résultats sont à considérer avec précaution, puisque les évaluations se basent sur les critères d'âge de départ à la retraite en vigueur en août 2010. En outre, ne sont pas pris en compte les autres départs (démission, mobilité hors section 36 ou hors CNRS...).

En février 2010, un questionnaire a été envoyé aux unités rattachées à la section 36 qui devaient renseigner plusieurs variables concernant le personnel (hors chercheurs statutaires) : nom, prénom, âge, statut, date prévisible de départ à la retraite (pour les statutaires), date de fin de contrat (pour les contractuels) et type d'activité assurée (recherche, appui à la recherche). Sur les 52 unités recensées comme « rattachées à la section 36 », 46 ont répondu (soit un taux de réponses de 89%). Les données font état de la présence de 374 « agents », soit 62 BIATOSS, 72 contractuels, 227 ITA CNRS et 13 « autres ».

On prendra soin de remarquer que la population d'ITA étudiée n'est pas directement comparable à celle des chercheurs de la section 36, et ce pour plusieurs raisons. Tout

d'abord les ITA ne sont pas organisés par section mais par métiers (BAP). Des chercheurs CNRS peuvent relever de la section 36 sans être affectée dans une UMR rattachées à titre principal à la section 36.

L'âge moyen des personnels de type ITA des unités de la section 36 est de 47 ans. Ce sont les ITA CNRS qui, en moyenne, sont les plus âgés (51 ans). Le personnel BIATOSS est âgé en moyenne de 48 ans. Enfin, les contractuels sont beaucoup plus jeunes, avec une moyenne de 34 ans.

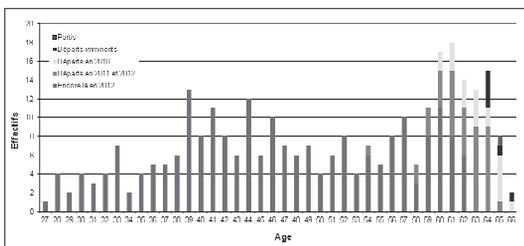
La structure d'âge confirme les tendances précédemment évoquées car si les différences d'âges entre ITA CNRS et BIATOSS ne sont pas très fortes (51 ans versus 48 ans), la composition est assez différente. On constate en effet une proportion bien plus importante chez les ITA CNRS de personnes susceptibles de partir en retraite (plus de 61 ans) dans les 5 années à venir : 26 % des ITA CNRS ont 61 ans ou plus contre 14 % chez les BIATOSS. Inversement, on constate une part plus importante de 30 ans ou moins chez les BIATOSS (8 % contre 3 %). De manière générale, les moins de 30 ans sont peu nombreux dans le personnel statutaire ITA CNRS, BIATOSS et autres des Unités de la section 36, comparés aux 31 % de moins de 30 ans présents parmi les contractuels.

## Évolutions et prévisions d'effectifs.

Les données suivantes ne concernent, selon les cas, que le personnel statutaire ou les ITA CNRS spécifiquement.

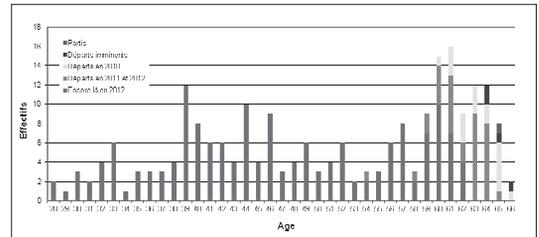
Les âges les plus représentés dans les unités relevant de la section 36 sont 61 ans,

**Graphique 4.** Effectifs par âge (statutaires) (1)



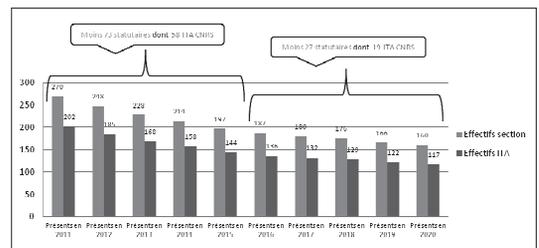
60 ans et 64 ans (graphique 4). En dehors de cette surreprésentation, on constate des effectifs assez élevés sur la tranche 39-46 ans. En revanche, les moins de 35 ans sont peu représentés. En partant du principe que les personnes qui prendront leur retraite d'ici fin 2012 sont « partantes », 23 % du personnel statutaire des unités relevant de la section 36 a quitté ou va quitter la section entre 2010 et 2012.

**Graphique 5.** Effectif par âge (ITA CNRS)



La situation des ITA CNRS apparaît équivalente quant aux évolutions démographiques à celle des chercheurs relevant de la section 36. La part de « partants » atteint 25 % de l'ensemble des ITA CNRS.

**Graphique 6.** Estimation des effectifs jusque 2020 (hypothèse de non recrutement)



De manière générale, sur la période 2011-2020, les personnels statutaires de type ITA affectés dans des UMR de la section 36 verraient leur effectif passer de 270 à 160, soit une baisse de 41 % (de 202 à 117, soit une baisse de 42 %, pour les ITA CNRS).

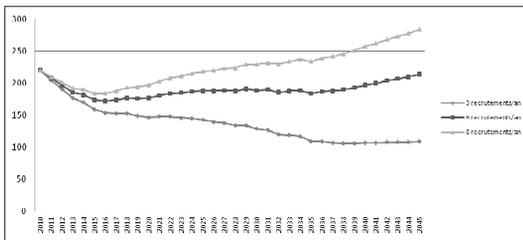
Sur la base des départs à venir, nous faisons 3 hypothèses de recrutements d'ITA CNRS sur la période 2010-2045.

– La première hypothèse se base sur un recrutement annuel de 3 ITA CNRS (hypothèse « faible »).

– La seconde hypothèse se base sur un recrutement annuel de 6 ITA CNRS (hypothèse « intermédiaire »).

– La troisième hypothèse se base sur un recrutement annuel de 8 ITA CNRS (hypothèse « forte »).

**Graphique 7.** Évolution des effectifs ITA CNRS à l’horizon 2045 selon les hypothèses de recrutement



Dans toutes les hypothèses, les unités relevant de la section 36 connaîtraient une baisse importante d’effectifs ITA CNRS jusqu’à 2015. En cas de recrutement « faible », cette baisse se poursuivrait à un rythme plus lent pour se stabiliser vers 2035 à un effectif d’environ 110 ITA CNRS ; cela équivaudrait à une baisse d’effectifs sur la période 2010-2045 de 50 % (graphique 10). En cas de recrutement « intermédiaire », l’effectif reprendrait lentement après 2015 pour connaître à partir de 2035 une croissance plus importante. En 2045, le nombre d’ITA CNRS reviendrait à peu près au niveau de 2010 (214 en 2045, 220 en 2010). L’hypothèse de recrutement « fort » conduirait à une reprise relativement soutenue après 2015 pour atteindre l’effectif actuel vers 2025. A l’horizon 2045, l’effectif d’ITA CNRS atteindrait 284 soit une augmentation de 30 %.

## 2 – THÉMATIQUES DE RECHERCHE

Les principales thématiques développées au sein des UMR rattachées à la section 36 concernent les migrations, le genre et les classes sociales (1), les activités économiques et les relations professionnelles (2), les sciences, la culture, l’éducation et la religion (3), la santé, le vivant et l’environnement (4) et, enfin, les libertés publiques et le système pénal (5).

### 2.1 MIGRATIONS, GENRE, CLASSES SOCIALES

#### Sociologie des inégalités

On assiste depuis les années 2000 à un « retour » des travaux sur les classes sociales, qui montrent comment différentes formes d’inégalités (génération, sexe, et origine ethnique notamment) se creusent et se conjuguent avec le milieu social. Les objets étudiés ont évolué dans plusieurs directions. Le thème de la mobilité sociale fait l’objet de grandes enquêtes statistiques souvent longitudinales (à l’UMR 7049 OSC notamment), qui cherchent à mesurer les différentes formes d’inégalités (salaires, revenus, prestige, éducation, patrimoine, etc.) et leur évolution. Les comparaisons internationales interrogent la spécificité française de déclasserment social des nouvelles générations d’adultes.

Un autre ensemble de recherches porte sur les transformations de la structure sociale, dans la discussion des travaux de Pierre Bourdieu sur la Distinction (UMR 8035 CSE ou au sein de l’UMR 5040 GRS), avec la question, centrale dans ce domaine, de la place de la culture dans la production des hiérarchies sociales et les discussions sur la pertinence de l’analyse en termes de classes.

Plusieurs travaux cherchent à étudier plus précisément les recompositions internes des

groupes sociaux. Se constituent ainsi de nouvelles bases de données et outils d'analyse sur le patronat (UMR 8035 CSE, UMR 7170 IRISSO); des enquêtes plus ethnographiques (UMR 8097 CMH, UMR 5040 GRS, UMR 8156 IRIS) portent sur les mutations du monde ouvrier à l'intersection de la scolarisation, du travail et de la famille, sur les trajectoires de groupes sociaux en quête de nouvelles identités, comme celles de jeunes issus de l'immigration, ou sur la déstabilisation d'une fraction des classes moyennes.

On a moins de recherches précises et empiriquement situées sur les rapports de classes « en action » (UMR 7217 CRESPPA), qui donneraient chair aux grandes enquêtes statistiques sur les inégalités ou les mobilités sociales et permettrait de formuler de nouvelles hypothèses sur la production des différenciations sociales et sur les mécanismes de domination.

Dans cette perspective, si on dispose de recherches sur le rapport des classes sociales à la culture, à l'école, à la mobilité ou à la politique, le thème des classes est très peu exploré dans son rapport avec la famille, d'une part, et avec le travail, de l'autre (malgré un léger regain de la sociologie des conflits de classes au travail).

Les migrations internationales et leurs effets constituent aujourd'hui un phénomène d'une ampleur considérable et d'une grande complexité (plus de deux cents millions de migrants à la surface de la planète, dont la moitié sont des femmes). La tension est forte en Europe entre les besoins en main d'œuvre de certains secteurs agricoles, industriels ou tertiaires (activités de « care » notamment) et la politique « Fortress Europe ». La connaissance de ces phénomènes, de leurs déterminants, de leur fonctionnement, de leurs dynamiques internes et de leurs implications, tant dans les espaces et sociétés d'accueil que dans les régions et pays d'origine, nécessite d'être développée autour d'une thématique propre, les migrations transnationales, et à travers une approche pluridisciplinaire (UMR 6588 MIGRINTER).

Le Réseau thématique n° 2 « Migrations, Altérité et Internationalisation » de l'Association Française de Sociologie réunit une majorité des chercheurs travaillant sur les migrations. Il contribue au développement et à la valorisation de recherches sur des thèmes novateurs ou de grande actualité; un premier axe concerne les relations entre État, politiques migratoires et société (UMR 6568 IREMAM), avec notamment l'interrogation sur l'adaptation des principes fondateurs des régimes démocratiques aux choix politiques d'exclusion et d'expulsion d'une partie de leur population un deuxième axe d'analyse porte sur l'articulation paradoxale entre valorisation de la « diversité » et stigmatisation de l'Autre, incarné par la figure du migrant et de l'exilé (UMR 8178 Institut Marcel Mauss); un troisième axe se fonde sur l'utilisation du principe de « l'égalité entre hommes et femmes » (UMR 5040 GRS) et sur une approche critique de la « naturalisation » des rapports sociaux qu'opèrent les discriminations tant sexuelles que raciales (UMR 8156 IRIS). On relève également des travaux sur le « transnationalisme » (migrations pendulaires, sur plusieurs pays à la fois, etc.), sur la migration dans les villes mondialisées et leurs effets en termes de classements sociaux (UMR 5040 GRS; UMR 5264 MODYS), sur les tensions et arrangements dans les relations entre anciens et nouveaux migrants, et entre migrants et autochtones, par exemple autour de l'imbrication du genre et du religieux (UMR 6127 LAMES; FRE 3229 LCSE). Enfin, d'autres travaux approfondissent les relations entre mobilité, genre et situation professionnelle par exemple dans le secteur du *care*, mais aussi dans des formes de circulations entrepreneuriales (UMR 5193 LISST) ou porte une attention plus particulière aux migrations féminines Sud-Sud (UMR 7217 CRESPPA).

Les nouvelles recherches sont moins orientées vers les questions classiques de l'intégration ou de l'identité, que vers l'étude des différentes formes de *discrimination*, de relations avec l'administration ou de nouvelles formes d'inégalité (ce que permettent les nouvelles enquêtes emploi de l'INSEE qui identifient la seconde génération), notamment

les inégalités en matière d'éducation (cf. l'enquête internationale EQUALSOC: UMR 2773 GRECSTA-CREST, UMR 5225 IREDU).

Les nombreux phénomènes sociaux qui accompagnent les migrations transnationales sur deux ou trois générations doivent aussi être étudiés par des approches « socio-anthropologiques » qui mettent en œuvre des méthodes ethnographiques pour saisir les *processus* engendrant les phénomènes observables. Ce type d'approche permet de considérer les émigrants/immigrants comme des *sujets* porteurs de *projets* et mobilisant des *ressources* certes limitées, dans des contextes locaux précis (FRE 3229 LCSE, UMR 5264 MODYS). Même les sans-papiers et autres clandestins, par leur simple présence, leurs actions collectives et les nombreux appuis qu'ils reçoivent font évoluer les normes de leur régularisation (UMR 5264 MODYS)

Les recherches sur le genre, conçu en France comme un rapport social de sexe, le croisent désormais de plus en plus systématiquement avec d'autres types de rapports sociaux (de classe, de « racisation », voire de générations), non pas comme intersection de dimensions indépendantes, mais comme articulation de rapports toujours « coextensifs » et « consubstantiels ». Le genre est étudié dans son rapport à l'emploi (UMR 7217 CRESPPA), au travail et aux carrières (UMR 8097 CMH).

## **Droit, discriminations et égalité**

En France, l'égalité est au fondement du pacte républicain ainsi qu'en témoigne l'article 1<sup>er</sup> de la Constitution française. Mais peut-on pour autant considérer qu'est consacré un droit subjectif à l'égalité ? Est surtout notable l'évolution des perceptions et des représentations du principe d'égalité, au regard de la règle de droit. Initialement, l'égalité juridique est d'abord apparue comme étant réalisée par la généralité, l'universalité ou l'uniformité de la règle de droit applicable à des sujets de droit abstraits. Cette égalité devant la loi ou la règle de droit impose à l'État de n'édicter que des normes neutres. De plus, le respect de l'égalité

de traitement suppose une comparaison des situations en présence, qui nécessite que soient choisis avec soin les termes de la comparaison. A cet égard, on remarquera que le droit français interdit le traitement différent de situations identiques, mais pas forcément le traitement similaire de situations différentes, contrairement au droit européen.

Cependant, les sociétés libérales ont toutes pris conscience de la nécessité d'agir, en combattant activement les pratiques discriminatoires, quels qu'en soient les auteurs et surtout les victimes (UMR 7106 CERSA). C'est ainsi la démarche adoptée par l'Union européenne, qui développe une politique de lutte contre toutes formes de discriminations, consacrant ainsi une approche plus catégorielle de la garantie du principe de non discrimination. En France, a été créée une Autorité administrative indépendante spécialement dédiée à cette action : la HALDE ; remarquons également qu'une technique probatoire comme celle du « testing » a été introduite dans le code pénal. La société internationale a aussi mis en place des instruments à vocation universelle visant à combattre les discriminations, alors même que la vision occidentale de l'égalité n'est pas partagée par tous les systèmes juridiques et religieux (UMR 7012 PRISME).

La question prend une autre dimension, avec le développement des mesures positives (dites discriminations positives) en faveur de personnes défavorisées. En suivant une logique compensatoire ou correctrice, le but est de réaliser l'égalité des chances, voire de rétablir l'égalité dans les faits, à partir de la règle de droit. Mais la revendication d'une égalité numérique, sous la forme de quotas a pu rencontrer des oppositions ; et il faudra attendre la révision constitutionnelle de 1999 pour que soit imposé l'objectif de parité entre les hommes et les femmes aux mandats électifs, puis celle de 2008 pour voir l'objectif de parité étendu à la sphère socioprofessionnelle (UMR 5114 COMPTRASEC). De la même manière, la problématique révélée dans le cadre des institutions européennes du traitement juridique des minorités a-t-elle pu révéler des nouveaux aspects du principe de non-

discrimination et d'égalité. De façon plus générale, cette thématique apparaît comme étant au cœur de toute réflexion sur la justice sociale.

## 2.2 ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES ET RELATIONS PROFESSIONNELLES

Les recherches sur l'activité économique et les relations professionnelles connaissent aujourd'hui un développement important, en apportant un regard sur l'économie complémentaire mais différent de celui de la science économique (relevant de la section 37), plus focalisée sur l'hypothèse d'agents rationnels. Ces recherches sont un creuset interdisciplinaire, dans la mesure où elles portent pour l'essentiel sur les rapports entre droit, économie et marché, ainsi que sur les questions de travail, d'emploi et de protection sociale. La démarche s'avère de plus en plus souvent « comparative » et/ou interdisciplinaire, sous l'effet certainement de l'inscription des chercheurs dans des programmes européens et internationaux.

### Droit et sociologie de l'économie

L'approfondissement de l'ancrage social des activités économiques est au centre du programme de la sociologie économique. Une première orientation se consolide autour de l'identification de réseaux sous-jacents aux échanges dans le cadre d'une sociologie des marchés qui se développe sur différents terrains, notamment dans les domaines du travail artistique (UMR 8036 Centre Raymond Aron, équipe CESTA) ou, des marchés financiers (UMR 8097 CMH) ou des activités d'innovation (UMR 5193 LISST). Une deuxième orientation porte sur les doctrines économiques et leurs effets sociaux, à travers une critique de la rationalité instrumentale inhérente à l'homo oeconomicus (UMR 8598 GEMAS), à travers, une sociologie du libéralisme (UMR 8035 CSE), ou encore une étude de la performativité de la

science économique (UMR 7185 CSI). Une troisième orientation se rapproche de l'économie institutionnaliste, à travers une attention aux dimensions institutionnelles des transactions économiques et avec le souci d'opérer un rapprochement entre sociologie et économie dans le cadre d'une socio-économie (UMR 8019 CLERSE) qui fait écho à la création récente d'une association d'économie politique.

Les rapports entre droit et économie prennent une importance croissante dans un contexte de globalisation, à partir de l'importation fréquente de thématiques développées aux États-Unis. Ainsi, La globalisation conduit à une forme de concurrence entre systèmes juridiques (Common Law et droit civil), leur attractivité économique et leur capacité à promouvoir la croissance, qui en fait une question débordant la sphère de la science économique et appelant le développement de méthodologies nouvelles en droit comparé. De plus, l'ouverture à la concurrence des ex-monopoles publics et de nouvelles formes du droit public économique ont fait émerger, dans la doctrine, le champ du droit de la régulation. Dans un ordre différent, la dimension économique de la régulation juridique, notamment judiciaire, devient un sujet de préoccupation partagé par la sociologie du droit et la recherche juridique, donnant ainsi des perspectives aux études socio-juridiques de l'activité juridictionnelle, dans l'ordre judiciaire comme dans celui des juridictions administratives. On retrouve ces thématiques émergentes au sein de laboratoires relevant la section 36. Ainsi en va-t-il des travaux développés sur l'économie du droit et de la réglementation (UMR 7170 IRISSE), ainsi qu'une mobilisation encore « méfiante » des juristes français dans les débats sur l'efficacité économique du droit. On doit cependant relever un axe de recherche « Économie et droit » au sein de l'UMR 8103 de droit comparé (Paris 1) développant, malgré des travaux sur le contrôle des marchés publics, les modèles des autorités de régulation indépendante ou encore les États face à la crise. Des travaux ont également été consacrés (notamment au sein de l'UMR 5598 CREDIMI) aux contrats internationaux et aux sentences arbitrales, révélateurs du développement d'un

droit transnational du commerce international (modalités de son élaboration, identification de ses auteurs...). Enfin, on soulignera l'existence d'études sur une base disciplinaire s'articulant dans des projets pluridisciplinaires, sur les formes de coordination et d'interaction des entreprises et des marchés dans les économies fondées sur la connaissance et l'innovation (UMR 6227 GREDEG).

## Travail, emploi et protection sociale

La question des relations entre travail, emploi et protection sociale suscite une activité de recherche importante, dans le contexte de politiques d'activation de la protection sociale et de « flexicurité ». Dans ce champ particulier dominé par les initiatives européennes (Stratégie Européenne de l'Emploi), les programmes européens contribuent à alimenter la réflexion sur la portée et les limites de ces initiatives, avec un intérêt pour la mise en œuvre de la Méthode Ouverte de Coordination ou pour leurs effets sur les « capacités » des acteurs (travailleurs, entreprises, territoires) comme, par exemple, dans le programme CAPRIGHT coordonné par l'UMR 8533 IDHE. On note ici une « montée des approches comparatives « relevée notamment au sein de l'UMR 5137 CERCRID et de son pôle » entreprise « réunissant des spécialistes en droit social, en droit communautaire, en droit commercial et en droit civil des affaires. On relèvera l'existence de recherches s'intéressant notamment aux relations entre marché du travail et protection sociale (UMR 3128 DCS à Nantes). L'UMR 6262 IODE développe un axe « protection sociale » prenant en considération l'ensemble des mécanismes de prise en charge (assurances sociales ou assurances privées), tous les risques sociaux (spécialement la maladie et la retraite) et la diversité des cadres d'acquisition d'une couverture sociale (avec un intérêt marqué pour le cadre professionnel), dans une approche le plus souvent comparative. Enfin, l'UMR 5114 COMPTRASEC dédie l'ensemble de ses activités à des recherches à dimension comparative dans le champ du droit du travail, des relations professionnelles et de la protection sociale,

avec une attention particulière accordée aux mutations des protections (intégration sociale et professionnelle, santé et sécurité au travail, vieillissement, risque social et questions d'emploi, fait familial générateur de droits sociaux et de non droit, articulations emploi/protection sociale) et aux tendances et enjeux des régulations (émergence d'un « droit social » de la mondialisation, droit et libertés des mobilités, pluralités de la négociation sociale, diversification des différends et de leur traitement).

La recherche sur les fondements institutionnels des relations professionnelles est un point de rencontre important entre sociologie et droit. En effet, au-delà du jeu entre les grands acteurs des relations professionnelles que sont l'État, les syndicats et les employeurs, se pose la question des « règles du jeu » que constituent notamment les règles juridiques, tant dans leur genèse que dans leur mise en œuvre. Cette activité de recherche est à mettre en relation renouveau avec la création d'un Réseau thématique « sociologie des relations professionnelles » au sein de l'Association Française de Sociologie sous l'impulsion de deux laboratoires du CNRS, l'UMR 8533 IDHE et l'UMR 5262 LISE. Depuis plus de trois ans, ce séminaire est devenu un lieu de rencontre entre sociologues, économistes et juristes. Cette dynamique se fonde sur la production de données nouvelles, notamment à travers l'exploitation de l'enquête REPONSE (Relations Professionnelles et Négociations d'Entreprise) de la DARES. Dans ce domaine, la construction européenne est devenue un terrain de première importance autour du mécanisme de « dialogue social européen » et des productions normatives qui s'en sont suivies. Dans le prolongement de cette dynamique, les travaux engagés mettent en évidence une intrication entre Union européenne, États-Membres et partenaires sociaux, donnant lieu aussi bien à innovation dans la méthode de discussion/négociation (MOC) que dans le type de produits normatifs (soft law, normes de RSE...). Dans le même temps, la recherche d'un « droit négocié » conduit à rechercher pour les acteurs plus de légitimité et, notamment, à revoir les règles de représentativité, aussi bien des organisations syndicales que patronales

sans oublier les conditions d'intervention de multiples « parties prenantes ». Enfin, également au sein de l'Union européenne, les restructurations sont un autre terrain de recherche où s'observe l'activité de représentants des directions d'entreprise et des salariés dans le cadre de règles du jeu fixées par la loi (UMR 5114 COMPTRASEC, UMR 3128 DCS, UMR 8533 IDHE).

Il y a aujourd'hui nécessité à soutenir le développement de recherches dans le champ « activité économique et relations professionnelles », dès lors qu'elles assument une démarche interdisciplinaire et comparative dans un contexte d'internationalisation accélérée des échanges économiques mais aussi de régionalisation et transnationalisation des normes sociales.

## 2.3 SCIENCES, CULTURE, ÉDUCATION, RELIGION

### **Sociologie de l'éducation, des sciences et du monde académique**

Les domaines de l'éducation et de la culture sont des points forts traditionnels de la sociologie française et continuent à faire l'objet de travaux importants. La sociologie de l'éducation est représentée au CNRS par des travaux qui permettent un certain nombre de diagnostics sur les difficultés du système français. Si la sociologie de l'éducation attire moins l'attention médiatique – il fut un temps où les sociologues étaient régulièrement sollicités pour diagnostiquer le malaise scolaire –, elle reste un terrain toujours fécond.

La question de l'échec scolaire et universitaire, et des inégalités qui structurent les parcours, continue de générer des travaux importants. L'élément marquant est sans doute la redécouverte de la dimension de classe de ces inégalités. Depuis une trentaine d'années, le passage d'une affectation régulée des collégiens dans les établissements publics à un système fondé de plus en plus sur le libre

choix, associé à la multiplication des options, favorise une modification sensible des cursus scolaires susceptible d'amplifier les inégalités sociales des trajectoires scolaires et les écarts de compétences entre élèves, comme les recherches tant nationales qu'internationales tendent à le montrer. Sur ces mécanismes de construction des inégalités sociales dans l'école, les investigations restent relativement limitées, non seulement en égard aux enjeux scolaires mais aussi en termes d'intégration ou de mise à l'écart des minorités ethniques. Le débat public est en effet centré sur la violence scolaire, appréhendée dans des manifestations individuelles, alors qu'elle est le symptôme de transformations structurelles, tout particulièrement de la marginalisation de certaines populations scolaires stigmatisées.

Autre voie de renouvellement observable, dans une tradition pourtant ouverte par Durkheim mais longtemps peu développée en France, les recherches relevant d'une sociologie des *curricula*. L'intérêt pour les diplômes et les certifications s'inscrit aussi dans ce cadre. En revanche, il serait sans doute important, compte tenu des évolutions structurelles de ces dernières années, de réactualiser les connaissances sur les acteurs du système éducatif, et pas seulement donc sur les enseignants.

### **Sociologie de l'art, des pratiques culturelles et sociologie des sciences**

La sociologie de l'Art et des pratiques culturelles compte unités CNRS reconnus dans le domaine (UMR 8036 CESPRA, UMR 8070 CERLIS, UMR 8566 CRAL). Par ailleurs des chercheurs CNRS poursuivent l'analyse des pratiques culturelles, notamment sur la base des enquêtes du ministère de la Culture, en s'inscrivant activement dans les débats internationaux sur la relation entre culture et stratification sociale (UMR 7049 OSC et UPR 3255). La section, par ailleurs, a recruté au cours des dix à quinze dernières années plusieurs jeunes chercheurs qui travaillent sur les mondes de l'art et les univers culturels – la littérature et

l'édition, l'art contemporain, le journalisme... – en prêtant un intérêt particulier à leurs transformations contemporaines, qu'il s'agisse de leur féminisation, de leur internationalisation ou des mouvements de rationalisation et de concentration économique (UMR 8035 CSE, UMR 7217 CRESPPA, UMR 8085 Printemps). Des travaux sur la dynamique de l'engagement dans les pratiques et sur la formation des goûts restent cependant à développer.

La sociologie des sciences, qui a connu un essor important dans les années 1980 et 1990, est en phase de renouvellement. Elle reste un domaine assez bien représenté au CNRS avec des travaux sur les institutions scientifiques qui devraient faire l'objet d'un renouvellement tirant parti des recherches menées depuis plusieurs décennies. On peut en particulier souhaiter disposer d'instruments permettant de rendre compte des articulations entre formes du raisonnement scientifique, cadres institutionnels de l'activité scientifique et rapports entre professionnels de la recherche et autres acteurs sociaux. Les travaux sur l'évolution des références normatives des chercheurs et des politiques de la recherche sont rares, alors même que l'on voit s'accroître les problèmes d'éthique, les cas de fraude, la recherche d'une visibilité à tout prix, la pression d'une injonction non seulement à publier mais à être cité, l'implication croissante des entreprises privées dans la recherche.

### **Propriété intellectuelle, nouvelles technologies, droit et langue**

Le développement de modes de diffusion massive dans le contexte des technologies numériques met aujourd'hui sérieusement à l'épreuve le modèle de protection du droit d'auteur, d'une part dans sa capacité à satisfaire les intérêts des créateurs et autres acteurs, donc dans son efficacité, et d'autre part plus en profondeur dans la légitimité même du système propriétaire mis en cause par une partie de la doctrine. On observe par ailleurs une floraison d'expériences nouvelles dans les modèles économiques et juridiques de mise à disposition

de contenus sur internet. D'où l'importance de continuer à développer dans ce domaine des recherches fondamentales (UMR 6224 CECOJI, UMR 5815 Dynamique du droit) travaillent en réseau, le plus souvent sous une double perspective comparatiste et pluridisciplinaire, en particulier avec des économistes.

Les questions de propriété intellectuelle concernent aussi des domaines de recherche à la jonction de la science et du droit, comme les recherches sur le vivant, sur les nanotechnologies dans lesquels la question des modes d'appropriation des produits de la science, des données ou encore des résultats constituent des enjeux majeurs (UMR 8103 de droit comparé). En outre, les grands enjeux de la numérisation des fonds, notamment des fonds patrimoniaux, soulèvent également d'importantes questions, mettant en forte tension mise à disposition et accessibilité d'un côté, outils de réservation et monopoles des contenus de l'autre, questionnant les relations public/privé. Les questions de propriété intellectuelle touchent ainsi à de nombreuses thématiques recherche.

De très nombreuses disciplines juridiques sont concernées par les rapports qu'entretiennent la norme juridique et les nouvelles technologies. Dans ce cadre, les nanotechnologies font figure d'exemple. Plusieurs unités de recherche du CNRS participent à des travaux concernant leur développement, au sein de réseaux interdisciplinaires riches (UMR 6224 CECOJI, UMR 6262 IODE, UMR 8103 de droit comparé). Le GDR CNRS 3178 Droit, Sciences et Techniques constitue à cet égard une précieuse source de collaborations.

La réflexion autour des relations entre le droit et la langue, fondamentale dans les recherches en droit comparé, constitue un axe de certaines des unités du CNRS (UMR 6224 CECOJI) autour des langages du droit et de la production des concepts, notamment en théorie du droit (UMR 7074 Centre de Théorie et d'Analyse du Droit). Les croisements « droit et langue » ne se limitent pas aux travaux sur la ou les langue(s) du droit. Ils devraient également s'ouvrir à l'analyse des questions juridiques et politiques liées à l'usage et à la pratique

de la langue. Enfin, tout en travaillant sur des questions classiques telles que la circulation des produits culturels dans la francophonie ou le droit de la langue (ou des langues), plusieurs chercheurs ont aussi manifesté un intérêt pour les problèmes posés par leurs collègues linguistes et informaticiens relatifs à la réutilisation des ressources linguistiques, entre autre pour des besoins d'ingénierie (UMR 7106 CERSA)

Le droit de la culture est paradoxalement un domaine d'apparition récente, par conséquent encore sous exploré, y compris dans ses liens de connexité avec d'autres domaines, par exemple avec le droit de l'urbanisme et le droit de l'environnement, questions pourtant fondamentales dans la perspective de développement des territoires. L'intérêt est ici d'engager une réflexion décloisonnée (soulevant des questions de droit privé et de droit public) et pluridisciplinaire (UMR 6224 CECOJI).

## **Droit et religions**

Les liens entre droit et religions ont traditionnellement fait l'objet d'études en France. Elles ont essentiellement porté sur l'histoire des institutions, l'histoire du droit canonique enseigné pendant des décennies à l'EPHE et sur les libertés publiques (liberté de conscience et liberté d'exercice du culte). Mais contrairement à d'autres États européens, l'étude systématique du droit étatique appliqué aux religions et des droits internes des religions ne motivait que peu de chercheurs et d'enseignants chercheurs. Les modifications récentes du paysage religieux ont généré des revendications contradictoires de la part de groupes religieux ou de particuliers. Elles s'expriment souvent par un phénomène de rejet des expressions religieuses jugées excessives par une fraction de la population alors qu'inversement un sentiment identitaire, se distinguant par un resserrement autour de certitudes traditionnelles parfois reconstruites, traverse une part importante des collectivités religieuses. Les pouvoirs publics sont confrontés à des problèmes inédits comme en témoi-

gnent les débats sur les « sectes », le port du voile intégral, la construction de minarets et les prescriptions alimentaires. Si les droits nationaux et le droit international sont fort logiquement invoqués dans ces affaires, certains des droits confessionnels ou des droits internes des religions tendent à s'imposer notamment par le biais de l'arbitrage ou de la médiation (UMR 7012 PRISME).

## **2.4 SANTÉ, VIVANT, ENVIRONNEMENT**

### **Sociologie de la santé et du vivant**

C'est sur le triptyque Hôpital-Profession-Maladie que s'est institutionnalisée la sociologie de la médecine et de la maladie, d'abord aux États-Unis puis plus tardivement en France dans les années 1970 et 1980. On peut s'interroger sur le glissement que représente l'appellation désormais courante de « sociologie de la santé ». Sans doute la réponse réside-t-elle dans l'évolution même de cet objet générique qu'est devenue la Santé. Les différentes crises sanitaires qui se sont produites au cours des années 1990 (Sang contaminé, Thalidomide, Amiante, Maladie de Creutzfeldt-Jakob, infections nosocomiales...) ont montré que la santé n'est pas réductible à la médecine, à ses institutions et à ses professionnels. De cette période, ont émergé de nouveaux acteurs individuels et collectifs, dont la légitimité à intervenir est désormais admise, que ce soit dans le registre politique, médiatique ou associatif. On assiste à ce que l'on peut appeler un processus de désenclavement de la santé, qui ne relève plus de la seule compétence médicale et s'installe sans doute durablement dans l'espace public, notamment par une forte demande de sécurité sanitaire.

Suite à la création des différentes Agences nationales, et notamment des Agences Régionales de santé (ARS), l'Hôpital est rentré dans une phase de profondes transformations, avec en particulier l'instauration d'une logique managériale. Ces transformations ont des

répercussions majeures sur le travail des professionnels et sur la manière dont la maladie est vécue par les malades et leur entourage.

La sociologie de la santé s'est inscrite dans ces contingences – sociales, politiques et économiques – contemporaines, singulièrement au travers d'approches pluridisciplinaires et internationales (UMR 8169 CERMES). Du point de vue thématique et méthodologique, il conviendrait d'insister sur un travail d'enquête sur l'hôpital et ses transformations ainsi que sur les recherches sur les interactions entre santé, travail et environnement qui peinent encore à mobiliser les chercheurs en sciences sociales, et en sociologie en particulier.

### **Sociologie des rapports homme-nature**

Les développements récents des recherches sur les rapports homme-nature se concentrent surtout autour du cerveau et de la cognition humaine, ainsi que sur la théorie néo-darwinienne de l'évolution. La coupure est actuellement très nette entre les recherches menées en sociologie en France et dans d'autres pays. Elle s'explique sans doute assez largement par les violentes polémiques suscitées par la sociobiologie dans les années 1980 et par le souci, chez les sociologues, de souligner les spécificités des faits sociaux humains, largement négligées ou ignorées dans beaucoup de modèles ou de méthodologies naturalistes. Cette posture de la sociologie française a des conséquences importantes pour ses rapports avec les sciences de la vie. En effet, elle s'est souvent accompagnée d'un rejet ferme de tout ce qui a trait, d'une manière ou d'une autre, à la biologie au sens large. Or, une telle posture présente un inconvénient scientifique majeur : elle a conduit la sociologie française à se détourner d'un champ de recherche, celui de l'articulation des connaissances accumulées par les sciences de la vie et par les sciences sociales ; ce faisant, la sociologie a tendu à laisser prospérer dans ce champ de recherche les formes les plus débridées et sommaires du naturalisme, faute d'y intervenir elle-même par une critique interne informée. Au total, actuellement, seules la philosophie des sciences

sociales et la théorie sociologique générale (UMR 8598 GEMASS, UMR 8178 Institut Marcel Mauss, UMR 8137 CERSES) ont entrepris, en France, un dialogue réel et informé avec les perspectives naturalistes. Les recherches théoriques sur des objets plus ciblés, ou les investigations empiriques, sont encore fort rares sur ce thème.

### **Droit de l'environnement**

Le développement des recherches en droit de l'environnement est éminemment lié à la prise de conscience d'un changement d'échelle, dans l'espace (jusqu'alors limité aux frontières internes des États) et dans le temps (s'agissant de la résorption et/ou de l'irréversibilité des effets). Dès lors, compte tenu des enjeux en termes de modèles de développement à court et moyen terme, conduit notamment à s'interroger sur la pertinence des normes en la matière. Une coopération au sein des sciences humaines et sociales et entre ces dernières et les sciences exactes s'impose aujourd'hui au regard de la complexité des questions posées et de la construction de réponses juridiques adéquates.

Le domaine des OGM suscite une littérature régulière technique, sur des points ponctuels, mais également un véritable débat juridique construit. Le domaine donne en effet lieu à un entrelacs de législations et réglementations d'autant plus complexes qu'elles sont à la fois foisonnantes, d'une technicité croissante (dissémination, coexistence des cultures OGM et conventionnelles, seuils de contamination, information, etc.) et éclatées entre les ordres juridiques national, communautaire et international (droit de l'OMC). Dans ce contexte, une réflexion plus particulière est menée sur les interactions entre connaissances biologiques et normes d'action publique, à partir notamment d'une comparaison des réglementations américaine et européenne en matière d'OGM, des brevets sur les inventions biotechnologiques, des normes éthiques et juridiques en matière de clonage animal. Il faut aussi ici relever l'évaluation de la législation et des guidelines dans l'Union

européenne relatives à la collecte, à la conservation et au transfert des tissus et cellules humains dans l'Union Européenne utilisés dans le domaine de la recherche biomédicale (UMR 8103 de droit comparé).

Une partie des recherches relève du droit international et comparé de l'environnement ; les investigations se portent notamment sur le rôle du juge dans l'émergence de principes d'intégration et de développement durable, sur les relations entre juge et experts dans les contentieux sanitaires et environnementaux ; elles concernent également le droit de la gestion de l'eau, les rapports entre agriculture et environnement, les changements climatiques... (UMR 6201 Droit public comparé, UMR 3128 Droit et changement social).

Enfin, c'est la conception même et l'effectivité du droit de l'environnement qui sont questionnées au travers de l'appréciation des multiples apports conceptuels (irréversibilité, générations présentes et futures, éthique environnementale, services écologiques) et principaux (intégration, précaution, responsabilité partagée). On s'interroge alors sur les mutations qu'il induit sur la hiérarchie des valeurs garanties par le droit, sur les concepts existants (patrimoine, solidarité / justice, cohérence), sur la répartition des compétences et sur la diversification des dispositifs de protection et de réparation sous l'égide de l'objectif du développement durable (UMR 6262 IODE).

## **2.5 LIBERTÉS PUBLIQUES ET SYSTÈME PÉNAL**

L'étude des normes restreignant les libertés de chacun, susceptibles d'être sanctionnées par l'intervention des acteurs du système pénal (polices, justice), est un domaine où les approches juridiques et sociologiques se rencontrent naturellement, qu'il s'agisse ou non d'entrer explicitement dans le cadre de la sociologie du droit. Ce champ d'études, qui correspond à des débats continuellement renouvelés dans les sociétés contemporaines sur l'usage légi-

time de la contrainte et les limitations apportées aux droits des personnes, a été renouvelé ces dernières années par la convergence de différents phénomènes : la consécration de la place éminente des droits fondamentaux dans la hiérarchie des normes à travers les jurisprudences des cours constitutionnelles et de la Cour européenne des droits de l'homme, les tensions croissantes entre liberté de circulation à l'intérieur de l'Europe et politiques restrictives à l'égard des flux migratoires aux frontières de l'Europe, de nettes tendances au raidissement des politiques pénales, les progrès scientifiques affectant la circulation des informations ou les recherches génétiques et posant de nouvelles questions sur l'équilibre entre liberté de disposer (de son corps, de ses idées) et contraintes d'ordre public (relatives à la sécurité et à la santé), les menaces relatives au terrorisme ou aux pressions des courants fondamentalistes en faveur d'un retour à une forme d'ordre moral.

Il paraît important que les unités rattachées à la section 36 poursuivent, en favorisant les collaborations entre sociologues et juristes, les investigations relatives à ce champ qui intéresse aussi les politistes, les économistes, les historiens, les géographes et les philosophes. L'analyse de l'essor et du rapide renouvellement des normes (internationales, européennes, nationales, mais aussi extra-étatiques) relatives aux droits fondamentaux (UMR 6201 Droit public comparé, UMR 8103 Droit comparé, UMR 7012 PRISME), ainsi que la redéfinition des débats classiques relatifs aux libertés d'expression (diffamation notamment de caractère racial, atteinte aux sentiments d'une communauté), de religion (statut des religions reconnues, traitement des phénomènes sectaires (UMR 7012 PRISME), d'aller et venir (avec les politiques pénales diversifiées recourant à des mesures privatives de liberté qui ne passent pas nécessairement par les prisons), de disposer de son corps (avec les mesures sanitaires ou sécuritaires entravant des libertés jusque-là incontestées, le recours à la notion de dignité humaine (UMR 7074 Centre de Théorie et d'Analyse du Droit) appellent de nouvelles études. Celles-ci combinent les approches quantitatives (avec l'importance

des statistiques policières, judiciaires et pénitentiaires, mais aussi de plus en plus des enquêtes en population générale (UMR 8183 CESDIP) et qualitatives, sur des terrains locaux et dans des dimensions comparatives, avec la prise en compte de tous les phénomènes de contournement ou de négociation des règles.

La sociologie des professions concernées – personnels des forces de sécurité, de l'appareil judiciaire, mais aussi des administrations et des collectivisé territoriales –, ou des organisations mobilisées sur ces terrains – secteur associatif, secteur privé (le domaine de la sécurité privée reste sous-étudié), églises, mouvements de citoyens) – doit continuer ses investigations pour avoir une meilleure compréhension de la recomposition des formations, des méthodes et des pratiques de régulation et de contrôle social à l'âge électronique (il suffit de songer à toutes les questions relatives aux fichiers et aux bases de données personnelles).

Les réformes qui affectent en France, en Europe et dans le monde le « service public » de la justice susciteront certainement des investigations sur les représentations sociales de la police et de la justice, les liens entre les décideurs politiques et les acteurs des institutions pénales, les contributions parfois croissantes des acteurs sociaux à la justice (en particulier celle des mineurs), l'éventuelle introduction en Europe de justices « communautaires » appliquant des statuts personnels sur la base d'un accord des parties ou sur les différents modes de règlement alternatif des conflits qui peuvent aller jusqu'à la délocalisation de justices étatiques ou des résurgences de la justice privée.

Une attention particulière devrait être portée aux acteurs de l'enquête et de l'action publique, selon une approche qui suppose évidemment des développements de procédure pénale mais aussi des analyses de droit public, d'histoire du droit, de droit comparé, de droit international et européen et de sociologie du droit. Il s'agit bien sûr du statut du ministère public mais aussi et plus largement du lien entre l'État et la répression avec des questions relatives à la police municipale, à la composition pénale, à la médiation pénale, à la

transaction par des autorités habilitées, aux autorités administratives indépendantes, à la coopération judiciaire et policière européenne et internationale, au rôle des associations et à celui des simples particuliers.

Devraient être aussi envisagés, toujours selon une approche pluridisciplinaire, le recours aux nouvelles technologies par les enquêteurs et les magistrats : l'examen de l'ADN et plus généralement l'ensemble des fichiers automatisés, l'audiovisuel, la surveillance sur internet ou encore les diverses formes d'enregistrement. Toutes ces questions portent sur le rapport essentiel entre les libertés publiques et le système pénal : elles permettront d'appréhender avec rigueur et précision les réformes annoncées de la procédure pénale, les arrêts de la Cour européenne des droits de l'homme ou de la Cour de justice de l'Union européenne ou encore les décisions qui pourraient être provoquées par la question prioritaire de constitutionnalité.

La connaissance des liens entre ces questions de « justice », les conceptions idéologiques ou les discours qu'elles véhiculent et les pratiques qu'elles induisent nécessite de nouveaux progrès dans la pluridisciplinarité en sciences sociales à l'intérieur et à l'extérieur de la section 36.

## CONCLUSION : ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

On ne peut que redire le problème démographique que connaît à court terme spécifiquement la section 36, en alertant à nouveau sur le risque de déficit important de chercheurs comme d'ITA. L'étude réalisée conduit à retenir la nécessité du recrutement de 6 à 8 CR 2 et 1 par an.

Ce rappel à proprement dit alarmant étant fait, la section 36 a la particularité de réunir à titre principal des sociologues et des juristes ; elle accueille également la démographie et un

certain nombre de chercheurs de disciplines connexes ou travaillant à la frontière de plusieurs disciplines relevant des SHS. Il y a là une richesse favorisant une véritable *interdisciplinarité*, notamment entre sociologie et droit, qui se traduit aujourd'hui, y compris au sein du comité national, par une réelle montée en capacité d'expertise de dossiers à caractère interdisciplinaire. Cette forte orientation interdisciplinaire associée à une *démarche comparative* constitue un atout majeur et un apport spécifique du CNRS à la recherche en SHS, singulièrement dans un contexte d'appels d'offres et de collaborations internationales.

En ayant le souci d'approfondir de telles orientations méthodologiques, on devrait porter une attention soutenue aux recherches fondées sur les rapports entre *droit et économie*, à celles mettant en relation *sociologie, démographie et droit*, ainsi qu'à la *sociologie du droit*. Certaines thématiques peuvent par ailleurs apparaître plus prioritaires. Ainsi :

- les approches de la *diversité* (genre, génération, origines, convictions, culture...) tant du point de vue normatif (répression, protection) que des espaces institutionnalisés (famille, éducation, travail, religion, services sociaux et sanitaires, services publics...), les *mobilités* (sociales, professionnelles, géographiques...), le *vieillessement* des populations (santé, emploi, dépendance),

- la sociologie et le droit des *sciences* et des *technologies* (ex. nanotechnologies), le *développement socio-cognitif* de l'être humain (modularité ou non de l'esprit, rôle des interactions sociales dans le développement cognitif), les *interactions entre l'homme et l'environnement* (notamment « santé-travail-environnement »),

- le *langage* et l'*écriture* du droit dans un contexte de globalisation, la *régionalisation* et *transnationalisation* du droit, le droit et la sociologie des *religions*, les *droits de l'homme* (acteurs et stratégies en jeu),

- les nouveaux acteurs et formes de la *régulation économique et sociale*, les nouveaux objets de la *socio-économie*, le droit et la sociologie des *marchés*.

Il serait fortement souhaitable que le CNRS soutienne de telles thématiques et des candidatures permettant de conjuguer approches nationale et internationale.

Par ailleurs, on doit s'interroger sur les affectations des personnels CNRS (Chercheurs et ITA) et les attentes qu'on peut en avoir. La politique d'affectation des chercheurs nouvellement recrutés ou en mobilité devrait prendre en compte tout d'abord la distinction Paris/province, sans qu'on se situe ici dans un retour chimérique à une volonté d'aménagement du territoire. Il s'agit de prendre acte de la constitution de quelques pôles d'enseignement supérieur et de recherche, comprenant des UMR CNRS ou des projets d'UMR. Les affectations des chercheurs doivent aller vers ces UMR et avoir, en leur sein, un effet structurant et dynamisant.

Ses affectations n'en resteraient pas moins très ouvertes au regard de l'éventail des types de recherches menées dans les UMR relevant à titre principal de la section 36. En effet, une des caractéristiques de la section est de réunir d'une part des équipes développant des travaux éminemment théoriques et savants (théories du droit et de la sociologie, histoire du droit), d'autre part des unités associant recherche fondamentale et appliquée.

Parmi les premières, il faut souligner combien leur présence et leur développement au sein du CNRS est, par bien des aspects, une condition de leur existence. Leurs travaux portent notamment sur les droits antiques et sur le droit français à l'époque moderne (UMR 7184 Institut d'histoire du droit), sur le droit écrit et les coutumes (UMR 5815 Dynamique du droit), l'histoire des institutions judiciaires en France et à l'étranger, s'intéressant tout particulièrement à la circulation des règles et des ouvrages de droit en Europe à l'époque moderne (UMR 8025 Centre d'histoire judiciaire). Ces recherches d'histoire ou de théorie du droit (UMR 7074 Centre de Théorie et Analyse du Droit, UMR 5605 Centre Georges Chevrier) sont importantes pour l'ensemble de la section 36, en termes de cultures juridiques, de transferts de droit, de comparaisons internationales et d'études des rapports entre droit et société. Il

en va de même des travaux développés sur le droit colonial (UMR 8025 Centre d'histoire judiciaire, UMR 5815 Dynamique du droit); cette dernière dimension, avec ses prolongements dans le droit actuel et dans la mémoire, est devenue très importante pour ouvrir l'histoire du droit français à de nouvelles perspectives, elles aussi susceptibles de fructueuses comparaisons avec d'autres pays d'Europe.

Le second type d'unités associe recherche fondamentale et appliquée sur des questions et demandes sociales centrales : délinquance, discriminations, éducation, emploi, environnement, famille, pauvreté, propriété, protection sociale, rapports sociaux, religieux, santé, sécurité, migrations... Il paraît nécessaire ici de souhaiter, pour l'avenir, la création de nouvelles UMR ou de jeunes équipes d'excellence «UMRisables», et non pas de se situer dans la seule logique de la concentration ou du maintien du statu quo, dans l'attente qu'à défaut de politique affichée le temps et l'âge des personnels fassent leur œuvre.

On a relevé que, comme pour les chercheurs, le nombre des personnels ITA affectés

dans les UMR relevant de la section 36 va connaître un problème démographique. La question de leur remplacement mais aussi de leur renouvellement se pose. Au regard de la compétition internationale ainsi que souvent de la réalité des services universitaires, le maintien voire le développement de certaines compétences et fonctions d'appui à la recherche apparaissent indispensables (gestionnaire, ingénieur d'étude et de recherche). On doit ici dire que, dans la perspective d'un renouvellement efficace, la procédure dite de «noemi» s'avère peu pertinente parce que lourde, lente et ne permettant que l'accès aux «compétences disponibles et volontaires» dans le cadre des services et unités du CNRS. En toute hypothèse, les personnels affectés devraient correspondre aux besoins réels des Unités.

Enfin, si au regard du risque de chute des effectifs chercheurs et ITA, des arbitrages devaient être faits, on doit clairement éviter de se situer dans une logique d'agence de moyens des universités et veiller à maintenir le capital réel de recherche d'excellence au sein des UMR CNRS.

---

## Note

(1) Les catégories mentionnées sur les graphiques 4 et 5 ont été conçues de la manière suivante : les «partis» sont les personnes mentionnées dans le questionnaire dont la date de départ en retraite était inférieure à 2009, cela concernait une personne, les «départs imminents» se rapportent à l'année

2010 et les autres catégories correspondent rigoureusement à leur étiquette. Le choix d'inclure des départs antérieurs à 2010 découlent de la volonté de comparaison avec l'étude réalisée en 2009 à propos des chercheurs (CR et DR) relevant de la section 36.

## ÉCONOMIE ET GESTION

### *Président*

Philippe ASKENAZY

### *Membres de la section*

Philippe ANDRADE

Edmond BARANES

Stefano BOSI

Denis BOUYSSOU

Thierry BRÉCHET

Ai-Thu DANG

Marc DEMERY LEBRUN

Laurent DEVILLE

Didier DO REGO

Hervé DUMEZ

Olivier GOSSNER

Monique KERLEAU

Valérie MIGNON

Van Phu NGUYEN

Martino NIEDDU

Carine NOURRY

Thierry PENARD

Hubert STAHN

Yvan STROPPA

Marie-Claire VILLEVAL

L'économie et la gestion rencontrent une très forte demande sociale. La crise économique qui s'est ouverte il y a deux ans n'a fait que renforcer cette demande. Il s'agit à la fois de décrypter les phénomènes et d'offrir des propositions de réformes aux gouvernants. En même temps, des pans entiers des sciences économiques et de gestion ont été déstabilisés par la crise. Nos sciences n'ont clairement pas su anticiper une crise qui n'est pas aujourd'hui comprise. De fait, l'économie et la gestion sont en partie en reconstruction. Cela exige des recherches non seulement appliquées mais aussi fondamentales qui mobilisent l'ensemble des outils et des approches théoriques et empiriques. Ces recherches rentrent en synergie avec celles portant sur les comportements des agents ou sur des problématiques économiques et sociales de long terme, qui repoussent la frontière scientifique des sciences économiques et de gestion : environnement, emploi, santé, rôle des institutions...

L'économie et la gestion traversent donc une phase d'intense innovation qui exige un important investissement humain et d'équipements. La recherche française a toute sa place dans cette dynamique mondiale. Les laboratoires CNRS, principalement des UMR, y participent largement, formant l'ossature de la recherche française avec de grandes équipes généralistes parmi les plus prestigieuses en Europe et des équipes spécialisées à forte visibilité. Le CNRS promeut également la multiplicité des approches.

L'économie est une des disciplines en SHS qui ont le plus profité des reconfigurations institutionnelles du monde académique français. L'« école » française est de plus en plus reconnue, en attestent les deux dernières médailles Clark – les deux tiers de ses récipiendaires ont été ensuite couronnés du Prix Nobel d'économie – décernées à des anciens étudiants français. Inversement, la France attire de plus en plus de chercheurs étrangers, le CNRS participant là aussi à cette ouverture (la moitié des chercheurs recrutés par l'actuelle mandature sont étrangers).

Toutefois, cette bonne santé n'est qu'apparente. Elle se heurte à une menace sur les capacités humaines de recherche. Du côté de l'économie, la fonte des effectifs étudiants réduit mécaniquement les postes d'enseignants chercheurs. Le phénomène est inverse en sciences de gestion où l'engorgement des filières oblige à réduire le temps de recherche en faveur de celui d'enseignement. Dans ce cadre, le CNRS joue un rôle pivot de plus en plus structurant, et ses chercheurs offrent une capacité de recherche et d'innovation clef pour les laboratoires. Or la section 37 est touchée de plein fouet par la politique de réduction des postes dans les sciences humaines et sociales. S'ajoutant à un flux naturel de départs notamment vers les meilleures institutions étrangères, le non remplacement des partants à la retraite induit une perte annuelle pour la section 37 entre 2 et 3% de ses effectifs ; les pertes sont également fortes dans les fonctions supports de la recherche. Cette menace démographique est incohérente avec l'investissement financier récent sur les structures de recherche en économie et gestion, et menace rapidement la place éminente de la France dans ces domaines en Europe.

# 1 – ÉTATS DES DISCIPLINES ÉCONOMIE ET GESTION

## 1.1 PRINCIPAUX CHAMPS, MÉTHODES ET INTERFACES

La section 37 couvre deux sous-ensembles disciplinaires, la gestion et l'économie, aux méthodologies et aux épistémologies variées mais souvent voisines tout en gardant des spécificités certaines. Les objets de l'économie et de la gestion peuvent être également communs, se traduisant par exemple pour la Finance par une vraie convergence des deux disciplines.

Le contour de la section est stable par rapport à la précédente mandature. Il peut toujours essentiellement se dessiner à partir des pôles suivants :

- Comportement de l'agent, rationalité, théorie de la décision, études de marchés
- Interactions entre agents, théorie des jeux, économie expérimentale, règles, normes, déterminants sociaux, philosophie économique, gouvernance des organisations, action des groupes d'intérêt et recherche de rente
- Marchés : fonctionnements, organisation, régulation
- Organisations industrielles, filières et systèmes productifs, gestion des organisations, management et stratégie
- Économie du droit
- Théorie de l'information, comptabilité, contrôle de gestion et systèmes d'information
- Échanges économiques internationaux, économie géographique, localisation des activités, territoires, réseaux, économie régionale
- Économie du développement, économie de la transition, économie comparative
- Économie de l'innovation et de la connaissance

- Macroéconomie : croissance, cycles
- Économie monétaire, taux d'intérêt, taux de change
- Finance de marché, finance d'entreprise, risque et assurance, économie bancaire
- Emploi, travail, ressources humaines
- Économie et gestion de la santé
- Économie et gestion de l'environnement
- Histoire de la pensée économique – histoire des faits économiques

La période récente a cependant été marquée par la montée en puissance de certains outils ou axes de recherche, à travers une dynamique propre – par exemple l'économie comportementale- ou à travers la réponse à une la demande sociale – par exemple, l'économie environnementale. Après un rappel des méthodes en économie et gestion, ce rapport de conjoncture, sans volonté d'exhaustivité, se concentrera sur certaines thématiques pour illustrer les dynamiques scientifiques présentes, et la place essentielle du CNRS en leur sein.

## UNE LARGE PALETTE DE MÉTHODES

Les disciplines de l'économie et de la gestion développent méthodes et théories à l'interface de nombreux autres domaines disciplinaires. La palette est large :

- modélisation théorique des comportements, de l'information et des interactions des agents économiques en statique et en dynamique. Les outils mathématiques, singulièrement de mathématique appliquée, sont alors mobilisés : optimisation, théorie des jeux...
- approche théorique institutionnelle et historique ;
- analyse empirique quantitative. Elle repose sur un usage croissant de bases de don-

nées micro comme macro de plus en plus riches, variées et profondes temporellement. Économistes et gestionnaires adaptent ou produisent des outils statistiques sophistiqués pour extraire l'information, notamment les potentielles causalités. Parallèlement, les méthodologies d'enquête sont améliorées, économistes et gestionnaires réalisant soit directement les enquêtes, soit jouant un rôle d'expert auprès des institutions pilotant les enquêtes ;

- analyse empirique qualitative. Cette approche principalement monographique s'appuie souvent sur des projets d'ordre pluridisciplinaire impliquant enquêtes et partenariats avec les acteurs économiques (entreprises, organismes, institutions) ;

- économie expérimentale. En fort développement (voir infra), cette méthode consiste à reproduire principalement en laboratoire un modèle économique de comportement dans des conditions contrôlées et répliquables. Les données recueillies peuvent alors être traitées économétriquement ;

- expérimentation sociale. Également en fort développement (voir infra), il s'agit de proposer des politiques publiques expérimentales et de les évaluer.

Les différents sous-champs disciplinaires mobilisent conjointement la plupart de ces méthodes.

## DE NOMBREUSES INTERFACES

La multiplicité des méthodes et des thématiques explique des interfaces effectives avec de nombreuses autres disciplines :

- *Mathématiques appliquées et statistiques* (par exemple en finance ou en économétrie) ;
- *Physique et mécanique* (par exemple pour la modélisation des phénomènes stochastiques) ;

– *Sciences de la nature et de la vie* (économie de l'environnement, économie de la santé, développement durable, économie industrielle);

– *Droit* (travail, emploi, normes et règles, théorie des contrats, propriété intellectuelle, économie du droit);

– *Sciences politiques* (management public et économie de la concurrence et économie publique, action des groupes d'intérêt et recherche de rente);

– *Histoire* (histoire des faits économiques, analyse diachronique des organisations);

– *Philosophie* (économie politique, Histoire de la Pensée en Économie, éthique);

– *Géographie* (territoire, réseaux, transport, économie géographique);

– *Sciences de l'ingénieur* (recherche opérationnelle, gestion de production, économies sectorielles automobile);

– *Sciences et technologies de l'information et de la communication* (économie et gestion de l'information, systèmes d'information, technologies et organisation);

Neurosciences (économie cognitive, knowledge management);

– *Psychologie* (théorie de l'agent, comportements, expérimentation, bien-être, marketing);

– *Sociologie* (études des organisations, réseaux sociaux, analyse de l'innovation, travail et emploi, éducation)

## 1.2 EXEMPLES DE DYNAMIQUES SCIENTIFIQUES FORTES

Les sciences économiques et de gestion connaissent des dynamiques scientifiques très fortes, dont cette partie expose quelques-unes des plus significatives. L'ordre retenu illustre successivement les trois moteurs de l'innovation dans nos disciplines: les faits économi-

ques et sociaux dont la crise économique depuis 2008 est un remarquable exemple, la dynamique interne des sciences, et enfin la demande sociale.

## LES SCIENCES DE GESTION FACE À LA CRISE

Contrairement aux sciences de gestion aux États-Unis, qui se sont éloignées des problèmes pratiques et qui, de manière récurrente, s'interrogent dans les grandes revues sur la réelle pertinence des théories qu'elles développent, la tradition européenne en gestion, et notamment française, s'inscrit plus directement dans ce que Stokes a appelé le *Pasteur's quadrant*: l'élaboration de concepts et de théories à partir de questions pratiques.

La période récente a été marquée par deux événements: dans le monde de la pratique, le déclenchement de la crise et, dans le monde académique, l'attribution du prix Nobel d'économie à Oliver Williamson. Ces deux événements peuvent être mis en relation dans la mesure où ils incitent les sciences de gestion à repenser à la fois l'organisation et le marché, et les relations entre les deux. Les organisations ont pris des formes de plus en plus diverses – réseaux, méta-organisations, partenariats public-privé, etc. – au point que le concept d'organisation doit sans doute être aujourd'hui redéfini. La crise est venue des fonctionnements des marchés financiers mais, comme toute crise, elle entraîne des redéfinitions et des réorganisations des marchés en général, la mise en place de nouveaux régimes de fonctionnement. L'opposition organisation/marché chère à Oliver Williamson demande elle aussi à être repensée: les organisations – notamment les firmes – créent de nouveaux marchés, et les marchés créent des formes nouvelles d'organisation, les innovations touchant conjointement les deux dimensions, qu'il devient donc difficile de continuer à opposer. Les formes de créations d'institutions dédiées aux fonctionne-

ments collectifs et à la production de biens communs ouvrent également un chantier important.

L'ensemble des disciplines de gestion contribue à la compréhension de ces phénomènes. C'est évidemment le cas de la stratégie, du marketing et de la finance mais l'évolution des compétences (gestion des ressources humaines), celle des modes de contrôle dans les organisations et aux nouvelles frontières des organisations, celle de la logistique qui interagit avec les formes organisationnelles et les marchés, les développements de l'entrepreneuriat et des processus d'innovation apparaissent également centraux pour analyser les dynamiques à l'œuvre dans les deux dimensions. Les questions de la régulation dans les organisations et entre les organisations, de la régulation des marchés, intégrant la dimension de la gestion des risques, publics et privés, avec également le problème de la mobilisation de l'expertise scientifique dans les prises de décision, font également du management public une sous-discipline particulièrement dynamique aujourd'hui.

Institutionnellement, les sciences de gestion bénéficient des traditions propres aux universités, aux écoles de commerce et aux écoles d'ingénieurs. Comme nous le développerons dans la prochaine section, le CNRS joue un rôle moteur dans le dialogue et l'équilibre entre ces traditions avec une orientation interdisciplinaire nécessaire au développement de la discipline. Les chercheurs CNRS bien que peu nombreux –les gestionnaires représentent environ 10% des effectifs de la section- jouent un rôle éminent et structurant dans cette dynamique.

## **LA MACROÉCONOMIE FACE À LA CRISE**

Pour la recherche en macroéconomie, l'épisode de la Grande Récession de 2008-

2009 sera très certainement aussi marquant que la Stagflation des années 1970. La majorité de la communauté des économistes considère que la réaction des autorités publiques a permis pour grande partie d'éviter le pire – un épisode comparable à celui de la grande dépression des années 1930 – grâce aux avancées de la recherche en macroéconomie sur la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle. Toutefois, au-delà de ce succès, la crise a aussi souligné des manques dans la compréhension des phénomènes macroéconomiques contemporains. En réaction, plusieurs chantiers ont d'ores et déjà été ouverts.

Tout d'abord, un premier programme de recherche revient sur les acquis de la fin des années 70s en termes d'analyse des politiques de stabilisation, en particulier monétaire. En effet, la crise a révélé que la stabilité des prix n'était pas suffisante pour assurer la stabilité financière et que cette dernière pouvait sérieusement affecter la stabilité macroéconomique. En outre, plusieurs travaux montrent que la période prolongée de faibles taux d'intérêt des années 2000 dans les économies développées a favorisé les comportements de prise de risque excessive par le secteur financier. En outre, plusieurs travaux montrent que la période prolongée de faibles taux d'intérêt des années 2000 dans les économies développées a favorisé les comportements de prise de risque excessive par le secteur financier. La politique monétaire pourrait donc avoir été une réussite en terme de contrôle de l'inflation mais un échec cuisant en terme de stabilité macroéconomique, d'autant plus qu'il n'est pas certain que la Stagflation des années 70s aie été plus coûteuse que la Grande Récession. De nombreux travaux vont d'ailleurs sans doute s'atteler à cette quantification. Enfin, la mise en place de banques centrales indépendantes du pouvoir politique n'a pas résolu tous les risques d'incohérence temporelle entre leurs objectifs énoncés et leurs réalisations effectives. La crise a été le révélateur d'une incohérence d'un nouveau type : au nom de la stabilité financière, les pouvoirs publics sont obligés de sauver des établissements financiers systémiques, et ceci indépendamment du risque qu'ils ont pu prendre. Ceci

incite du coup ces institutions à augmenter leur exposition au risque et donc fragilise la stabilité financière. Au total, l'épisode 2008-2009 a souligné que stabilité financière et stabilité macroéconomique peuvent être des objectifs qui ne coïncident pas. La question posée est donc celle des instruments nécessaires pour atteindre les deux simultanément.

De manière connexe, un autre ensemble de travaux étudie les racines des déséquilibres internationaux et leur influence dans la crise. Il est clair que la politique monétaire déflationniste de la Chine a été un des facteurs de la faible inflation qu'on connue les économies développées sur les années 2000. Si les politiques monétaires de ces économies avaient été plus restrictives au cours de cette période, l'instabilité financière engendrée par la création excessive de liquidités aurait peut-être pu être évitée mais au prix d'un risque fort de pressions déflationnistes. Les autorités monétaires des pays développés se sont en quelque sorte retrouvées devant un dilemme. La crise récente pose donc la question de savoir s'il est possible de définir une politique monétaire indépendante de celle des autres acteurs majeurs de l'économie mondiale dans un monde intégré commercialement et financièrement ainsi que celle des instances et instruments qui seraient appropriés pour une coordination internationale de ces politiques.

Enfin, les ajustements observés au cours de l'épisode 2008-2009 mettent en évidence la nécessité de revenir sur certaines simplifications des modèles avec lesquels les économistes analysent les fluctuations macroéconomiques. Premièrement, ces modèles ne peuvent pas rendre compte d'une chute généralisée de plus de 30 % des actifs financiers sur les trimestres de fin 2008 et début 2009. L'introduction dans les modèles macroéconomiques d'un secteur financier imparfait, du fait d'asymétrie d'information et de la responsabilité limitée des intermédiaires financiers, est donc un programme de recherche prioritaire. Deuxièmement, les modèles usuels ne sont pas capables d'expliquer une chute de la consommation privée plus forte que celle de la production lors de plusieurs trimestres de la

récession de 2008-2009, pas plus que la chute de 30 % de la part du commerce international dans la production mondiale sur la même période. Introduire dans ces modèles des effets de l'incertitude et/ou du risque individuel non assurable semble être une voie prometteuse pour rendre compte de ce report immédiat de certaines dépenses et donc des différentes composantes de la demande agrégée. Troisièmement, la relative stabilité des prix, des salaires et des anticipations des agents au cours de la crise est frappante au regard des prédictions des modèles standards. Une voie de recherche prometteuse pour comprendre l'inertie de ces variables d'ajustement est de considérer que les acteurs économiques n'ont qu'une vision imparfaite et incertaine de la situation macroéconomique, notamment parce qu'acquérir et comprendre l'information pertinente est coûteux. Outre la rigidité dans la réaction des agents à certains développements macroéconomiques, cette information imparfaite peut aussi expliquer les phénomènes de coordination excessive des individus sur une information partielle mais que tout le monde comprend.

Les chercheurs macroéconomistes du CNRS participent très activement à ces débats en cours. À titre d'exemple, plusieurs d'entre eux travaillent en interaction avec la Banque de France, et sont donc au cœur de la redéfinition de l'équilibre entre stabilité macroéconomique et stabilité financière. Par ailleurs, ce renouvellement de l'analyse met aussi en relation des chercheurs spécialistes de différents champs de l'économie. Ainsi, les spécialistes de la microéconomie du secteur bancaire interagissent avec les macroéconomistes pour définir le futur de la régulation macro et micro prudentielle du secteur financier. De même, les spécialistes de la théorie du choix individuel sont aussi sollicités pour intégrer des comportements plus complexes que ceux prédit par l'hypothèse de rationalité en information parfaite.

Toutes ces avancées seront importantes non seulement pour comprendre l'épisode extrême de 2008-2009 mais aussi parce qu'elles auront des implications sur la compréhension des fluctuations macroéconomiques en temps

normal et donc sur la définition des politiques optimales.

Elles s'accompagnent d'une discussion des grands paradigmes macroéconomiques des vingt dernières années, marquées par un engouement pour les théories des anticipations rationnelles, et la reprise dans les modèles macro-économiques de fondements normatifs issus d'une microéconomie discutée par ailleurs dans son propre champ. De fait, on assiste dans tous les courants de pensée et dans les grandes institutions internationales à un recentrage sur le questionnement relatif aux institutions et aux processus de régulation. Plusieurs unités CNRS (CEPN, Gretha, PSE, ou Clerse) jouent ainsi un rôle central dans les développements internationaux d'une macroéconomie post-keynésienne de la Grande Dépression de la fin du  $xx^e$ , ou sont une référence internationale originale dans l'animation de réseaux de recherche portant des clés de lecture institutionnalistes des régulations et conventions financières qui ont conduit et la crise de 2008-2009.

## **ÉQUILIBRE GÉNÉRAL ET LA THÉORIE DES JEUX : DEUX TRADITIONS FRANÇAISES**

Par nature, l'économie théorique est totalement transversale à la discipline économique. Toutefois, on peut distinguer un sous-champ que l'on qualifie souvent de « théorie économique », qui exploite intensément la disponibilité de (nouveaux) outils de formalisation hérités de disciplines telles que les mathématiques ou la physique.

Ce domaine est traditionnellement très puissant en France. La théorie des jeux voit le jour avec les travaux sur l'oligopole de Cournot (le premier exemple d'équilibre de Nash) en 1838. Walras et Debreu ont apporté des contributions capitales en théorie de l'équilibre général.

Cette puissance est en partie l'expression de la force des écoles scientifiques françaises, en tout premier lieu mathématique. Elle se traduit par exemple par une intense activité de production en économie mathématique, production souvent en collaboration avec des mathématiciens ou des physiciens, notamment de laboratoires CNRS. Une part significative des chercheurs CNRS et enseignants-chercheurs universitaires de ce domaine sont d'ailleurs de formation initiale scientifique. Les unités généralistes parisiennes demeurent un lieu de renommée internationale en ce qui concerne l'économie mathématique et, en particulier, la théorie de l'équilibre général. L'école d'économie de Toulouse est une référence en théorie de jeux notamment appliquée à l'économie industrielle. Au total, une bonne part des unités CNRS dispose d'une équipe compétitive dans au moins un de ces domaines.

Ces champs connaissent en outre un renouveau scientifique. La notion centrale de la théorie économique est celle d'équilibre, qu'il s'agisse d'un équilibre de Nash ou de Walras, d'un équilibre partiel ou général. Si l'on considère la notion d'équilibre on remarque qu'elle s'est construite par couches successives avec alternance de périodes où l'équilibre générale s'impose et périodes où l'équilibre partiel revient en force suite aux impasses de l'équilibre général.

La théorie de l'équilibre général puise ses racines dans les travaux de Quesnay, Smith et Say. Walras formalise le système des marchés aux dix-neuvième siècle, mais ne dispose pas des outils nécessaires à montrer l'existence d'un équilibre général. L'impasse de la modélisation chez Walras et Pareto catalyse le retour à l'équilibre partiel pendant la période de Marshall au début du vingtième siècle. Keynes et Hicks remettent au goût du l'équilibre général. Il faudra attendre les théorèmes du point fixe élaborés par des mathématiciens à partir des années vingt pour que Arrow et Debreu puissent démontrer l'existence d'un équilibre général aux années cinquante. Dans la *Theory of Value* de 1959, Debreu montre la voie à suivre : la dynamique et l'incertitude peuvent et doivent être intégrées dans la théorie de

l'équilibre général. Les années soixante seront en effet les années de l'introduction de la dynamique en équilibre général, tandis que les années soixante-dix et quatre-vingt ceux des anticipations rationnelles et du *real business cycle*.

Aujourd'hui on assiste à une nouvelle crise de la pensée de l'équilibre général. Les imperfections de marché écartent l'équilibre de l'optimum. On observe l'émergence d'équilibres multiples et instables. La politique économique est appelée à corriger les imperfections : restaurer d'un part le bien-être, stabiliser d'autre part. Dans ce cadre, plusieurs critiques se lèvent contre l'hypothèse d'anticipations rationnelles, d'agent représentatif etc.

Keynes considérait à part les marchés de la monnaie, du travail et du capital. Comment faut-il concevoir ces marchés en équilibre général? La théorisation de la monnaie semble encore insuffisante à représenter la complexité du réel : les modèles qui prennent en compte les imperfections monétaires et financières ne font pas l'unanimité et ignorent les bulles et les chocs sur les croyances qui fragilisent une économie mondialisée. L'économie du travail n'arrive pas à modéliser le chômage involontaire en équilibre général. La modélisation de l'accumulation et la distribution du capital en théorie de la croissance repose sur des hypothèses naïves telles que l'agent représentatif ou l'homothéticité des préférences. Comment introduire les asymétries d'information (des imperfections parmi d'autres) en équilibre général reste aussi un problème ouvert.

D'une part, on voit bien comment fonder une politique économique sur des bases théoriques si fragiles puisse être périlleux. D'autre part, une vision macroéconomique ne doit pas oublier l'interconnexions des marché via les effets substitution et revenu. L'équilibre général doit donc rester dans l'agenda de recherche de tout théoricien qui souhaite inspirer la politique économique.

La crise de l'équilibre général a vu un regain progressif ces dernières vingt années de l'équilibre partiel. La théorie des jeux a

permis à l'économie industrielle, à l'économie du travail etc. des percées considérables. Le calcul stochastique a aussi permis des avancées remarquables en finance. Toutefois les problèmes d'existence, multiplicité, stabilité et optimalité se posent pour toute théorie de l'équilibre et ces théories en équilibre partiel ne font pas exception. Par exemple, les mécanismes de sélection des équilibres en théorie des jeux posent toujours problème. Les tentatives de penser des équilibres de Walras-Nash avec interaction stratégique des individus en équilibre général n'ont pas non plus donné les fruits espérés.

Ces difficultés de la théorie au niveau micro ou macro, partiel ou général, forment un vide que la statistique cherche à combler. D'une part, la modélisation structurelle cède le pas à la tentation économétrique de représenter tout phénomène économique par le biais de régressions de toute sorte sans interrogation préalable sur la rationalité du système. D'autre part, on assiste à une avancée de l'économie expérimentale qui ne satisfait pas les critères épistémologiques galiléens ou poppériens.

## **ÉCONOMIE COMPORTEMENTALE ET ÉCONOMIE EXPERIMENTALE : UN NOUVEAU » CHAMP SCIENTIFIQUE QUI ILLUSTRE LA VISION DE LONG TERME DU CNRS**

L'économie comportementale et l'économie expérimentale sont l'un des domaines de recherche actuels les plus en expansion en économie-gestion au niveau international. Accompagnées par le CNRS, des unités ont su rapidement prendre une place significative dans ces domaines. Si les deux approches se

recouvrent largement, elles ne se situent toutefois pas tout à fait sur le même plan. L'économie comportementale développe un ensemble de modélisations théoriques qui visent à intégrer des considérations psychologiques dans le raisonnement économique des agents. L'économie expérimentale fait davantage référence à la méthode de réfutation employée, consistant à reproduire principalement en laboratoire un modèle économique dans des conditions contrôlées et répliquables. Il s'agit de dépasser l'homo-économus de la microéconomie pour mieux le reconstruire.

L'économie expérimentale a pris naissance sous forme d'expériences pédagogiques en classe au début des années cinquante et a connu une croissance accélérée comme méthode d'investigation au cours des deux dernières décennies. L'attribution du Prix Nobel à Reinhard Selten en 1994 pour ses travaux en théorie des jeux et à Daniel Kahneman (un psychologue) et Vernon Smith en 2002 pour leur contribution respective à l'introduction de considérations psychologiques dans l'analyse du comportement économique et à l'analyse expérimentale des marchés a marqué l'ancrage fondamental de ces approches dans la discipline tout en encourageant de nombreux chercheurs et doctorants à s'inscrire dans cette démarche.

Initialement plutôt réservée à tester des prédictions issues de la théorie des jeux et de la théorie de la décision, la démarche expérimentale a pénétré désormais la plupart des champs de l'économie appliquée. L'économie publique recourt depuis longtemps aux expériences pour mieux décrypter les logiques de coopération et de défection en présence d'externalités ou bien encore les déterminants de la fraude. En organisation industrielle, l'expérimentation nourrit les réflexions sur le design optimal des institutions et des règles de marché. En économie du travail, elle a permis une analyse empirique contrôlée de l'efficacité des incitations et des contrats. En économie de l'environnement, elle vise à caractériser la valorisation des biens environnementaux par les agents. En économie de la santé, elle aide à comprendre les phénomènes d'addiction. De

son côté, la finance comportementale a étudié les phénomènes d'imitation sur les marchés et le rôle des biais cognitifs dans la propagation des déséquilibres. Plus récemment, l'économie du développement a connu de profondes avancées grâce aux expériences de terrain. De manière transversale, l'économie comportementale a permis de mieux identifier les préférences sociales, les processus d'apprentissage, la rationalité limitée et contextuelle des agents.

Les évolutions récentes en matière d'économie comportementale et expérimentale peuvent être caractérisées en trois points : l'extension des perspectives, le renforcement de la pluridisciplinarité, et la diversification des méthodes. Sur le premier point, l'expérimentation recouvre des travaux qui, à une extrémité, adoptent une échelle dépassant largement le laboratoire (par exemple en associant des mesures expérimentales à des enquêtes représentatives de la population ou en développant des expériences sur Internet) et, à l'autre extrémité, adoptent une échelle infime (à travers l'observation du cerveau pendant la prise de décision). Sur le second plan, la neuroéconomie repose sur la coopération entre économistes et neuroscientifiques. En utilisant les techniques d'imagerie médicale comme la résonance magnétique fonctionnelle ou la tomographie, on peut observer quelles régions du cerveau et quels neurotransmetteurs s'activent durant le processus de choix des agents. Ceci contribue à l'effort de compréhension de la nature des émotions et sensations, des types de récompenses et des raisonnements et conflits qui guident les choix des individus. Par ailleurs, de la finance aux processus d'apprentissage, les apports des méthodologies expérimentales gagnent les sciences de gestion, ouvrant une convergence dans les deux disciplines économie et gestion. Enfin, sur le plan de la méthode, la diversification se manifeste par le développement de nouvelles techniques de laboratoire (alliant mesures comportementales et mesures physiologiques par exemple). Plus fondamentalement, à l'image de l'évaluation des politiques publiques (voir infra), elle se traduit par la multiplication des expériences hors laboratoire,

artefactuelles (transposition des conditions du laboratoire à des populations non étudiantes) ou de terrain (modification de l'environnement habituel pour des sous-échantillons randomisés), afin de renforcer la validité externe des résultats expérimentaux.

Si les États-Unis occupent une part importante des productions du domaine, la recherche européenne en économie comportementale et expérimentale est particulièrement dynamique tant sur le plan de la production scientifique que des recrutements. Les travaux en économie comportementale et en économie expérimentale sont accueillis dans les meilleures revues généralistes de la discipline et les publications d'excellence en neuro-économie peuvent atteindre des revues comme *Science* ou *Nature*.

En France, les travaux en économie comportementale sont développés dans une dizaine d'unités de recherche, la plupart disposant d'un laboratoire expérimental. Le soutien du CNRS a été fondamental pour le développement de l'économie expérimentale en France. Cette aide s'est manifestée au milieu des années quatre-vingt-dix à travers la création d'une plateforme technologique, le recrutement de chercheurs et l'acceptation qu'une partie des chercheurs CNRS prenne le risque de s'investir dans un champ encore en jachère il y a 15 ans.

Précisément, une plateforme technologique visant à permettre l'équipement de laboratoires expérimentaux dans plusieurs UMR (1) (CES, CREM, GATE, GREMAQ, LAMETA) reliées dans le réseau NETEX animé par le GATE. Le soutien du CNRS se traduit également par le financement de plusieurs projets PEPS de l'INSHS et la contribution au financement de colloques et workshops internationaux permettant de mieux faire connaître les travaux des laboratoires français à l'étranger. Mais à une époque où les contrats ANR ou contrats européens peuvent permettre le renouvellement ou l'extension des équipements, l'aspect le plus fondamental du soutien du CNRS porte sur les recrutements. En effet, l'expérimentation requiert des moyens humains importants, notamment sur le plan

informatique. L'affectation aux laboratoires d'ITA pour accompagner ces recherches est une condition majeure de succès et un atout dans la compétition internationale dans ce domaine.

Complémentairement, il est un sujet pour lequel le soutien du CNRS pourrait s'avérer déterminant. Il s'agit de la réglementation du financement des expérimentations en économie. Un principe fondamental de la méthode est la mise en œuvre d'incitations monétaires associées à la prise de décision et variables d'un sujet à l'autre. Il convient donc de faire évoluer la législation de manière à ce que la loi Huriet sur les expérimentations humaines puisse intégrer le cas des expériences en économie.

## **L'EXPÉRIMENTATION SOCIALE DES POLITIQUES PUBLIQUES : UNE « NOUVELLE » MÉTHODE EMPIRIQUE**

La création d'un fond d'expérimentation sociale en France doté de 150 millions d'euros et l'introduction d'un principe d'évaluation systématique de certaines politiques publiques ont donné un coup de projecteur en France à l'expérimentation des politiques publiques, champ scientifique en fort développement au sein de l'économie.

Le principe de l'expérimentation sociale repose sur une limite inhérente à l'évaluation des politiques publiques : il est statistiquement difficile d'évaluer l'impact d'une politique publique en comparant uniquement la situation de la population « bénéficiaire » avant et après la mise en œuvre de l'action. Par exemple, une amélioration des résultats scolaires simultanée à une réforme de l'éducation ne signifie pas qu'il y ait une causalité entre les deux phénomènes. C'est ce problème que tente de résoudre l'expérimentation sociale,

en s'inspirant de la méthodologie médicale d'évaluation des traitements. Le vocabulaire est d'ailleurs proche. La politique à évaluer est ainsi appelée « traitement », le groupe qui y est soumis est le « groupe de traitement », celui qui n'y est pas soumis est le « groupe de contrôle ». Le groupe de traitement et le groupe de contrôle forment l'échantillon et l'expérimentation est une « expérience contrôlée », chaque groupe étant choisis « randomisés » c'est-à-dire aléatoirement. Le traitement est alors la cause de la différence de comportement et des résultats des deux groupes.

L'expérimentation sociale a été pratiquée à grande échelle dans les pays anglo-saxons et d'Europe du Nord dès les années 1970. Mais c'est l'application massive de cette méthodologie dans les pays en développement qui a marqué la dernière décennie, sous l'impulsion d'économistes de l'université de Harvard et du MIT, notamment Michaël Kremer. Sont testées sur le terrain des « micro » politiques publiques diverses comme l'impact de la distribution de vermifuge sur l'absentéisme scolaire en Afrique. L'objectif est de fonder scientifiquement des politiques publiques efficaces.

Ces approches rencontrent un très fort engouement des grandes agences de développement dans le monde dont l'Agence Française de Développement mais aussi des ONG qui recherchent une efficacité de leur soutien au développement. La recherche française occupe une place importante dans ce mouvement de recherche. Deux facteurs y participent. La France dispose historiquement d'unités de recherche sur les politiques de développement comme l'UMR Cerdi de Clermont-Ferrand, qui intervenaient notamment dans les anciennes colonies françaises avec des financements significatifs de l'AFD. Le second est lié au fait qu'Esther Duflo, une des principaux leaders de ces recherches au niveau mondial, est française et enseigne régulièrement en France. L'antenne européenne du laboratoire américain qu'elle dirige, le J-Pal, le plus puissant laboratoire d'économie du développement dans le Monde doté de centaines de millions de dollars, est ainsi installé au sein de l'École d'économie de Paris.

Grâce à d'importants financements publics traduction d'un fort intérêt de l'État comme des collectivités locales, des équipes de recherches spécialisées notamment au sein de deux UMR, PSE et le CREST réalisent désormais de multiples expérimentations en France en mobilisant de nombreux doctorants. Le RSA représente la première expérimentation sociale de grande ampleur. Elle a porté sur 34 départements, et a amené à une véritable rupture dans l'approche des politiques publiques en France. Le domaine de l'éducation est particulièrement visé. De la mallette des parents (formation des parents d'élèves) aux internats d'excellence, ce sont des chercheurs CNRS ou des unités CNRS qui assurent le pilotage des expériences (design et méthodes statistiques).

Très séduisante, l'expérimentation des politiques publiques commence cependant à susciter des controverses avec des chercheurs d'autres sciences humaines et sociales (histoire, sociologie, sciences politiques, philosophie). En effet, cette approche procède de fait d'une fragmentation du fait social et tend à faire abstraction des contingences historiques. En outre, en prétendant fonder des politiques publiques dans des domaines très variés y compris non directement économiques, sur des bases « neutres » et scientifiques, elle tend à exclure le choix démocratique au profit d'une élite experte.

Au sein des économistes, le débat sur des politiques « science evidence based » se pose dans des termes comparables. Les théories institutionnalistes françaises conventionnalistes ou régulationnistes, sans rejeter à priori ce type d'approches, cherchent à incorporer d'emblée à leurs schémas interprétatifs les contingences historiques ou les conventions de construction sociale des fonctionnements économiques ou de prix des biens / services produits. Ce débat englobe celui de l'expérimentation d'indicateurs de performance renouvelés sur lesquels puisse se refonder la décision publique. Cette réflexion porte sur notamment la pertinence d'indicateurs macro-économiques majeurs : le PIB et la croissance économique, au regard des améliorations réelles du bien être perçu, et des paramètres envi-

ronnementaux, productivité au regard d'une économie de service, où les performances immédiates n'ont pas nécessairement de sens, sont interrogés. Ils donnent lieu à des débats internationaux, dans lesquels les économistes français des laboratoires CNRS sont largement présents, du fait de l'ancienneté des travaux (fin des années 90 pour certains) et de l'effet stimulant de « commission Stiglitz » installé par le Président de la République.

## ÉCONOMIE DE LA SANTÉ : UNE DEMANDE SOCIALE FORTE

Les économistes et gestionnaires de la santé ont deux missions distinctes quoique en lien l'une avec l'autre : contribuer à une meilleure compréhension des comportements économiques dans le domaine de la santé, d'une part, fournir des éléments d'aide à la décision publique, d'autre part.

La dynamique des recherches « théoriques » a été tirée au cours des années écoulées par deux grandes thématiques :

- Compte tenu de ses caractéristiques structurelles, le champ des soins de santé constitue un lieu d'application privilégié des théories de la concurrence imparfaite. Mobilisée pour l'analyse d'un vaste ensemble de situations bilatérales avec asymétries d'information, tant dans le champ de la production de soins que dans celui de leur financement, la théorie du principal-agent a constitué une niche bien établie en micro-économie de la santé.

- Le deuxième est l'évaluation. Historiquement encadrée dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice, la littérature contemporaine a donné une place majeure aux analyses économiques dites « coût-utilité » et à leur avatar le QALY (année de vie ajustée sur la qualité) et du coup ouvert de vastes débats autour du problème de l'acquisition d'une information apte à fonder une évaluation fiable du bien-être individuel.

À côté du segment « académique » de la recherche en économie de la santé, il existe un segment, beaucoup plus diversifié de recherches empiriques qui appliquent concepts économiques et méthodes économétriques à des questions concrètes de choix publics (évaluation des technologies ou des pratiques de soins, définition de priorités de santé publique) ou de politiques (financement, distribution et performances des systèmes ou services de soins de santé) et ceci dans la tradition de la *Health Services Research* américaine. Les collaborations interdisciplinaires sont fréquentes (entre économistes et sociologues, entre économistes et politistes, entre économistes et médecins, entre économistes et épidémiologistes ou spécialistes de santé publique).

Récemment, la question de la définition même de la santé, de sa valeur et de ses déterminants, paraît – au plan de la recherche académique – prendre le pas sur les questions de régulation des systèmes de soins, relativement en retrait. Deux voies de recherche futures émergent :

- La notion de « *capital santé* » est au point de départ d'un vaste ensemble de recherches qui apparaissent structurées autour de l'idée que le capital santé n'est pas distribué et accumulé également entre tous les individus, d'une part, et que les comportements individuels jouent de façon déterminante dans ces différences, d'autre part. Cette voie de recherche répond aux pressions d'une forte demande sociale (*cf.* les fléaux de la santé publique : tabagisme, obésité, conduites addictives, etc.) et, dans un contexte très favorable à l'économie expérimentale ; elle devrait s'exporter aisément dans les lieux de recherche académique.

- À partir de la notion ancienne de « *capital humain* », un nombre croissant de recherches s'intéressent aux interrelations dynamiques entre éducation et santé, entre conditions environnementales et états de santé ou, dans une perspective de croissance soutenable, entre qualité de l'environnement, santé des agents et développement économique. La réflexion sur le renouvellement des indicateurs de richesse, qui appréhende la santé comme

dimension de la qualité de vie s'intègre à ce type d'analyse. L'approche *macro-économique* qui jusqu'à présent a eu une place modeste en économie de la santé devrait connaître des développements importants, en particulier dans le cadre des débats sur la réforme du financement des dépenses de santé.

Résultant pour partie de cette double évolution -effacement d'une logique de domaine au profit d'une logique de discipline et recentrage de celle-ci sur les fondamentaux disciplinaires- il n'existe plus d'unité « santé » labellisée par le CNRS en section 37. (2) Au début des années 2000, une politique de coopération entre le département SHS et l'Inserm autour des questions d'économie et de sociologie de la santé avait conduit à la mise en place de formations de recherche sous double tutelle. Elle aurait dû aboutir sur la constitution de pôles de référence interdisciplinaires et spécialisés sur les problèmes de santé publique. Ce processus a été stoppé et l'une des équipes a disparu. (3) Le soutien du CNRS aux recherches interdisciplinaires impliquant l'économie de la santé dans un cadre problématique plus large incluant la santé publique, l'environnement, la dynamique des systèmes socio-environnementaux, etc. passe aujourd'hui par la CID 45. Si au sein des unités, subsistent des équipes santé (GATE, LEM, par exemple), la tendance semble être de faire de la « santé » une application parmi d'autres dans des champs plus généralistes, du type « Méthodes économiques des politiques publiques » (à l'exemple du GREQAM). Ce sont dans ces équipes que l'on retrouve les jeunes chercheurs, à profil « économie de la santé » recrutés récemment. Enfin, les chercheurs CNRS ou d'unités CNRS participent activement à de puissantes Chaires Santé public/privée dans des grandes universités ou grandes écoles, comme celle de Dauphine financée par l'assureur Allianz.

## L'ÉCONOMIE DE L'ENVIRONNEMENT FACE À LA CRISE ÉCOLOGIQUE

L'économie de l'environnement se propose d'étudier la relation entre les activités économiques et l'environnement, en utilisant des outils développés par la théorie économique. Les recherches en économie de l'environnement sont en étroite interaction avec des disciplines SHS comme la démographie ou la géographie, ou hors SHS comme la climatologie ou les sciences de la vie. La demande sociale autour des questions environnementales a renforcé la dynamique des recherches dans ce domaine au niveau mondial.

Les économistes de la discipline ont d'ailleurs récemment participé aux débats ayant des répercussions sur les sociétés comme le débat sur la mise en place d'un système de régulation environnementale (marché de permis européen, taxe carbone), l'évaluation de politiques publiques, des mécanismes de compensation (notamment dans le cadre du changement climatique), le Grenelle de l'environnement, les rapports du GIEC, plusieurs étant récipiendaires du médaille Nobel. La participation à ses démarches souvent supranationales reflète l'intégration internationale des chercheurs français.

De fait, les recherches en économie de l'environnement se tournent majoritairement autour des questions suivantes : croissance durable, bien-être collectif, changement climatique, efficacité versus équité des politiques environnementales, régulation des marchés de l'énergie et des ressources naturelles, prise en compte de l'information, risque et incertitude, analyse coûts-bénéfices, grands modèles, dynamique et complexité de la relation économie-environnement, dynamique des populations, comportements socialement responsables, etc.

Bien que le CNRS a su saisir rapidement cette opportunité en renforçant sa présence dans la recherche sur ces thèmes, notamment

à travers la création de l'INEE, la CID 45 et des programmes interdisciplinaires ayant un fort accent sur l'environnement, les économistes CNRS travaillant sur les questions environnementales sont relativement peu nombreux par rapport à d'autres champs comme l'économie du travail ou l'économie publique, reflétant dans une certaine mesure une tradition française. D'un point de vue institutionnel, on observe une relation de complémentarité intéressante entre les recherches développées au CNRS et celles à l'INRA à la fois au niveau thématique et méthodologique, avec des unités communes aux deux EPST.

Les recherches en économie de l'environnement et des ressources naturelles sein du CNRS demeurent concentrer pour une bonne partie sur Toulouse ou sur Paris avec par exemple l'UMR Cired ; le LAMETA à Montpellier possède une expertise dans l'évaluation de la biodiversité. Les recherches sont plus dispersées pour le reste de la France. Au-delà des spécialistes, la question environnementale s'invitent dans de nombreux autres champs de l'économie et de la gestion, comme l'économie industrielle, de l'économie de l'innovation (par exemple l'UMR GReTha coordonne au niveau européen des recherches sur l'innovation environnementale) et plus récemment l'économie du travail autour de la problématique de la reconversion écologique des économies.

Au total, les sciences économiques et dans une moindre mesure les sciences de gestion, connaissent d'importantes évolutions tant dans les faits, dans les idées que dans les interactions avec les autres disciplines, évolutions dont les sections précédentes ne sont que des illustrations. Dans ce cadre, le maintien d'une école française en histoire des faits économiques et de la pensée économique notamment dans des unités CNRS est un atout. La dynamique des thématiques de recherche qui touchent une majorité de laboratoire, les interactions entre ces laboratoires rend en outre difficile de thématiser les unités de recherche qui sont toutes des UMR, commune avec des universités et de plus en plus des grandes écoles et d'autres EPST singulièrement l'INRA. Enfin, cette effervescence rend nécessaire de largement s'app-

puyer sur la communauté académique pour la construction de la stratégie scientifique du CNRS. La section du CoNRS, émanation de cette communauté, y aurait toute sa place.

## **2 – MUTATIONS INSTITUTIONNELLES DE LA RECHERCHE**

### **2.1 L'ÉCONOMIE ET LA GESTION AU CNRS : UN FACTEUR D'OUVERTURE**

La présence de notre discipline des sciences économiques et de gestion au CNRS se manifeste plus par l'importance relative des unités associées au CNRS dans notre univers de recherche que par le nombre de chercheurs CNRS (près de 180 chercheurs payés en 2010) au regard du total des enseignants chercheurs dans les universités et les grandes écoles (autour de 6 000). La politique menée en matière de relations CNRS-Universités est donc pour nous un élément particulièrement déterminant. Or cette relation a été profondément modifiée ces dernières années. Quatre événements majeurs, survenus ces dernières années suite à la mise en œuvre de la loi sur la recherche de 2006, ont contribué à la faire évoluer : la partition du CNRS en dix instituts, la loi d'autonomie des universités, la création d'une agence nationale d'évaluation, l'AERES, et d'une agence nationale de la recherche, l'ANR. Les Labex ou Equipex dans le sillage du « grand emprunt » représentent un nouveau choc dont il est encore impossible d'anticiper les implications pour la gestion et l'économie.

Ces évolutions sont donc largement en cours et restent dépendre des options que retiendront tant les instances universitaires que celles du CNRS, dont les sections du comité national, même si a priori leurs marges de manœuvre restent étroites.

**Tableau 1. Nombre d'enseignants 2008-2009 (hors Prag)**

Section CNU	Titre	Pr	MCF	Total
5*	Sciences économiques	541	1 261	1 802
6*	Sciences de gestion	394	1 456	1 850
Grandes écoles**	Sciences de gestion			1 800 (estimation)
Grandes écoles	Sciences économiques			Plusieurs centaines

\* Source DGRH AI I

\*\* Estimation Fnege (L'évaluation des enseignants chercheurs en sciences de gestion, 2010)

## UN CNRS EN DIX INSTITUTS

Depuis la partition du CNRS en 10 instituts (dont deux dits nationaux ont vocation à couvrir toute la recherche nationale dans leur domaine) la question de la place des sciences économiques et de la gestion se double d'une interrogation sur les rapports avec les différents instituts et l'opérationnalisation d'une réelle interdisciplinarité. Ce questionnement tient pour une large part à certaines caractéristiques particulières des sciences économiques et de gestion. Leur forte médiatisation et leur ancrage naturel avec le monde socio-économique et professionnel peut donner le sentiment que ces disciplines sont susceptibles de bénéficier d'une large autonomie, voire d'assurer toute seule leur développement avec le seul soutien des établissements d'enseignement-recherche et des contrats de recherche publics ou privés. Pour une autre part, l'interrogation résulte du caractère très prégnant des approches d'économie et gestion couvrant tous les domaines des activités sociales et appelant des coopérations étroites avec des pans de la recherche très différents : énergie, environnement, santé, STIC, mathématiques appliquées... De ce fait, toutes les unités sont rattachées à l'INSHS (Institut National des

Sciences Humaines et Sociales), mais nombre d'entre elles ont aussi des liens avec d'autres instituts, en particulier l'Institut National Écologie et Environnement INEE. Ces liens avec différents instituts peuvent jouer un rôle important pour favoriser une véritable interdisciplinarité, qui s'inscrive au meilleur niveau des disciplines concernées (4). Au-delà de quelques exemples, témoignant de l'existence de recherches interdisciplinaires de qualité, ces doubles rattachements sont restés jusqu'à ce jour peu nombreux mais des réflexions sont en cours dans plusieurs unités.

La question reste de savoir si cette possibilité pourrait être et/ou devrait être plus largement exploitée qu'elle ne l'est. C'est difficile à établir. Les comparaisons internationales comme les témoignages de collègues étrangers ne font pas ressortir de retard significatif en matière d'interdisciplinarité pour notre discipline. Au vu de la singularité, sur le plan international, de la structure CNRS, la question pourrait être posée différemment : l'association au CNRS se traduit-elle par une plus grande et/ou meilleures pratiques de l'interdisciplinarité que ce que l'on observe à l'étranger ? Ce bilan vaudrait d'être tenté.

Favoriser l'interdisciplinarité implique, au-delà de la proximité institutionnelle que procurent les instituts, que les programmations de recherche comme l'évaluation des résultats concourent à cet objectif. Les pratiques des instituts manquent peut-être d'ambition sur ce plan.

## DE NOUVELLES INSTANCES D'ÉVALUATION

En matière d'évaluation tout d'abord la référence à un cadre très disciplinaire de supports de publication reste prédominante, et ce d'autant plus qu'elle est largement conditionnée par les pratiques de la nouvelle agence nationale d'évaluation AERES, en charge de

l'évaluation des universités où la structuration disciplinaire est très forte. Il faut souligner avec intérêt que l'AERES a fait le choix, dans nos disciplines, de maintenir, pour ses évaluations, le découpage disciplinaire du Comité national en appréhendant dans le même contour les sciences économiques et de gestion. Ce choix facilite l'articulation avec le CNRS pour les évaluations d'équipes tout autant que pour la définition des critères de publication. Cette articulation reste toutefois circonscrite et il est de ce point de vue important que le CNRS conserve et ajuste en conséquence ses propres critères d'évaluation.

La concertation ne devrait pas s'en tenir aux seules appréciations d'éléments de bibliométrie. Si l'AERES est en charge de l'évaluation de toutes les unités de recherche, le CNRS reste maître des choix d'association et dispose sur ce plan d'une certaine marge de manœuvre. Le CNRS et ses instituts peuvent a priori user de cette latitude pour favoriser certaines programmations, voire pour ouvrir la voie à des recherches interdisciplinaires intéressantes. Mais dans notre discipline comme dans la plupart des cas, le taux de renouvellement des unités n'est pas très élevé et rend difficile d'impulser par ce biais une programmation scientifique trop directive. Il est vrai que des associations d'unités qui seraient de trop court terme auraient l'inconvénient de déstabiliser des travaux de recherche ou des spécialisations qui ne se développent qu'au terme de longs apprentissages collectifs. C'est sans doute une condition nécessaire pour avoir une recherche au meilleur niveau.

L'orientation de la recherche au CNRS, qui permettrait de favoriser l'interdisciplinarité comme l'exploration de questions nouvelles ou de domaines nouveaux, passe donc pour une grande partie par les nouvelles formes d'incitation mises en place depuis 2007.

## **2.2 DE NOUVELLES FORMES D'« INCITATION » ET DE VALORISATION DE LA RECHERCHE**

La mise en place de l'ANR a constitué un instrument majeur d'orientation de la recherche. Les financements ANR, très supérieurs aux dotations récurrentes des unités CNRS, ont tout d'abord été attribués sur sélection de projets individuels sans référence aux options stratégiques du CNRS, qu'il s'agisse des axes prioritaires ou des thématiques centrales des unités associées. Même si nombre de projets furent attribués à des membres d'unités CNRS, cette déconnexion initiale entre soutiens ANR et soutiens CNRS est apparue comme assez problématique par les hiatus que le financement de certains projets a pu créer dans les dynamiques collectives des équipes et les orientations de leurs direction. Dans un second temps il fût demandé pour plus de cohérence que les projets soumis à l'ANR aient l'aval des directeurs d'unités CNRS. Des appels d'offre thématiques de l'ANR eurent un même objectif en cherchant à valoriser des potentiels de recherche existants. Néanmoins l'objectif du Ministère (au printemps 2010) d'accroître la part des projets blancs montre bien que la question de l'harmonisation entre les stratégies de l'ANR et du CNRS (comme des autres EPST) reste posée. De ce point de vue, les sciences économiques et de gestion rencontrent exactement le même type de difficultés que les autres disciplines.

En 2009 le ministère a créé deux nouveaux instruments afin de valoriser les métiers de la recherche, les chaires d'excellence universités-organismes et les primes d'excellence, toutes deux très controversées en fonction précisément des difficultés que présente leur articulation avec les logiques de fonctionnement des organismes.

Les instituts ont eu à gérer ces nouveaux instruments ; pour les chaires cette gestion s'est faite en collaboration avec les universités. Le premier souci a été de veiller à ce que la création de ces postes de chaires en question ne se

fasse pas au détriment des postes de titulaires, une garantie difficile à contrôler à terme...d'autant que le problème de l'intégration des titulaires de ces chaires après 5 ans n'est pas clairement résolu. Pour la pérennité de cette forme de valorisation de la recherche, les critères et les modalités d'attribution restent cruciaux. Les critères d'excellence scientifique transcendent ils tous les critères cherchant à privilégier une orientation de recherche, un partenariat interdisciplinaire, un domaine nouveau? À l'inverse, la volonté d'«universalité» de certains critères (de nature bibliométrique par exemple) ne risque-t-il pas de léser, en début de carrière, des trajectoires de recherche subdisciplinaires nécessitant au contraire des temps de maturation plus importants (pour constituer des bases de données, accumuler du matériau de terrain, s'appropriier des champs de littérature importants...). Tout ciblage est souvent contesté, faute d'avoir établi clairement et fait connaître largement les bases de la priorité qui lui est donné.

Mais l'alternative qui cherche dans l'absolu à récompenser l'excellence pose au moins autant de problèmes dans une discipline assez divisée en champs qui diffèrent parfois radicalement dans les prémisses qu'ils retiennent, rendant pour le moins difficile tout ce qui impliquerait un ordre entre eux. En deux ans, 5 chaires CNRS liées à la 37 ont été pourvues. Le niveau des candidats s'est avéré globalement équivalent à celui des admissibles non admis aux concours CR2. Reste que ces postes attirent bien moins que les concours CR CNRS.

L'intérêt de la chaire reste de conduire à affirmer d'emblée des choix d'orientations scientifiques en liaison directe avec les universités. La chaire est par définition ciblée et s'inscrit dans les projets scientifiques d'une unité, ce qui donne à cette forme d'incitation un fort caractère collectif. Rappelons néanmoins que cela soulève deux types de question. D'une part il convient de bien afficher les critères et les conditions de candidature à ces chaires. Il s'agit de la transparence du mode de gestion de cet outil. D'autre part il ne faudrait pas que ces créations apparaissent comme un substitut à la création de postes de chercheurs. Ce risque est

grand en période d'austérité budgétaire Or la substitution d'un ensemble de titulaires de chaire à un corps de chercheurs changerait la nature de l'organisme... et poserait tout un autre genre de questions quant à la pérennité de certaines orientations programmatiques, la capacité de capitaliser des compétences de recherche dans des collectifs stables

Les détachements de chercheurs enseignants au CNRS pour une période donnée constituent une forme d'incitation un peu de même nature. Mais là encore des critères précis sont nécessaires tant sur le nombre de détachements que sur les critères d'attribution. En particulier la dimension collective du projet de détachement a souvent été nettement relativisée au profit d'une excellence académique. Mais la politique en matière de détachement souffre encore d'une certaine imprécision, qui résulte pour partie de la décentralisation opérée en faveur des universités invitées non seulement à valider les candidatures mais aussi pour partie à en sélectionner une partie, sans qu'une politique générale n'ait été définie. Les détachements représentent à l'évidence un moyen de soutien à la recherche important dont les objectifs mériteraient d'être précisés entre CNRS et universités. En 37, le nombre de détachements à 100 % est de l'ordre douzaine par année. Ce chiffre est plutôt faible par rapport aux autres sections.

Plus largement d'ailleurs, l'expérience montre qu'en parallèle de l'activité d'évaluation et de labellisation d'équipe, l'attribution de personnel a été un des leviers d'intervention les plus forts du CNRS : qu'il s'agisse de chercheurs ou de personnels de soutien. Dans un contexte et sous des formes différentes, cela reste tout à fait vrai. Il est par contre intéressant de souligner que si les réflexions sur les formes d'emploi de chercheur ont été actives (avec la constitution des Chaires par exemple), cela a moins été le cas pour les postes de personnels de soutien (ingénieurs de recherche et administratifs) pourtant essentiels à envisager dans des perspectives des nouvelles formes d'alliance CNRS – Université. De même, sans occulter les risques de précarisation, il paraîtrait particulièrement utile de reposer l'oppo-

tunité de favoriser l'insertion dans la recherche d'assistants de recherche ou de jeunes post doc, en élargissant, d'une certaine manière, aux financements pérennes, ce qui se fait déjà avec les contrats de recherche.

La période récente a aussi été marquée, au niveau des établissements universitaires comme des grandes institutions de recherche par le développement important de mesures individuelles d'incitation et de valorisation de la recherche : elles peuvent concerner tous les personnels de recherche des équipes, qu'il s'agisse de chercheurs CNRS ou d'enseignants-chercheurs : c'est le cas des primes d'excellence ou bien de certains dispositifs locaux de primes à la publication. Dans un contexte de stabilisation des salaires et de réduction globale des perspectives de carrière, l'effet de telles dispositions est d'autant plus marqué que les sommes en question sont importantes. Les critères d'attribution sont de ce fait encore une fois particulièrement déterminants mais n'ont pas réellement fait l'objet d'un débat public dans la communauté. Bien plus, pour ce qui est du CNRS, certains des critères retenus mettent en porte à faux le comité national en renforçant les conséquences individuelles de certaines de ses décisions, au détriment d'une approche plus collective : c'est plus particulièrement le cas avec les médailles, par exemple, qui relèvent souvent autant d'un effet de signal sur une composante particulière de la discipline que d'une récompense individuelle.

Un arbitrage entre logique d'excellence académique et appui à une recherche dans un domaine prioritaire ou pour soutenir une perspective particulièrement novatrice va encore s'imposer. Si la fonction du CNRS est bien de favoriser la prise de risque dans des champs de recherche nouveaux, elle est aussi de soutenir l'investissement de long terme, temps long nécessaire à la fois pour certaines innovations mais aussi pour atteindre le meilleur niveau à l'échelle internationale dans certains domaines.

La politique d'incitation, de valorisation de la recherche dont on peut a priori se féliciter court le risque de privilégier des dimensions

individuelles au détriment de formes plus collectives ou de l'embauche de nouveaux chercheurs. De plus un système d'incitation financière trop discriminant peut avoir plus d'effets négatifs sur la motivation de ceux qui se sentent non valorisés que de véritables effets positifs de prises de risque chez ceux qui se trouvent récompensés. Un système d'incitation à la recherche au sein d'un établissement comme le CNRS doit privilégier des dynamiques collectives, sous peine d'accentuer un individualisme déjà poussé dans un milieu où la sélection à l'entrée a déjà été sévère. La question serait différente dans un système plus laxiste à l'embauche qui justifierait plus facilement un système de récompense nettement discriminant. La montée en puissance du système d'incitation souligne la spécificité des procédures d'évaluation pour ce qui concerne le CNRS. Nombre des écueils ci dessus visent les primes d'excellence, individuelles par nature (alors que traditionnellement nombre de prix scientifiques en sciences exactes récompensaient toute une équipe scientifique). Penser ces primes dans la perspective d'un organisme comme le CNRS invite à privilégier des critères qui renforcent la cohérence du collectif (en dotant les nouveaux entrants de crédits de fonctionnement et d'équipement particulier, en récompensant certaines mobilités, géographiques, thématiques, là encore sur des critères clairs et contribuant nettement à la prise de risque et à l'innovation.

Par ailleurs, le développement de dispositifs individuels de récompense ancrés sur les seules productions de recherche se heurte à la montée en puissance, en parallèle, des tâches à accomplir en matière d'évaluation, d'organisation et d'administration de la recherche. Le poids grandissant des appels à projets, des revues scientifiques et des dispositifs d'évaluation de tous types suppose en effet une mobilisation toujours plus grande des « pairs » acceptant de consacrer temps et énergie à de telles tâches collectives. La capacité d'intégrer la prise en compte de telles tâches dans les dispositifs d'incitation apparaît déterminante, sous peine de créer et d'accentuer progressivement un clivage entre des stratégies individualistes et des spécialisations opportunistes.

On retrouve là les arbitrages difficiles entre critères généraux d'excellence scientifique et critères ciblés à l'appui d'une politique scientifique. À ces difficultés structurelles, se sont rajoutées l'absence de critères d'attribution, un flou sur le mode de sélection pour la campagne 2010. Le résultat est un nombre de candidatures bien en deçà de ce que l'on peut attendre en économie et gestion.

## 2.3 SUR L'ÉVALUATION DES CHERCHEURS ET DES UNITÉS

Les difficultés que peuvent rencontrer les politiques de revalorisation évoquées ci-dessus montrent l'importance qu'il y a pour un organisme de recherche à conserver ses propres outils d'évaluation. La question de l'articulation entre évaluations réalisées au niveau des universités et évaluations faites par l'organisme CNRS se pose. Dans les deux cas l'utilité d'une évaluation externe n'est pas remise en cause. Encore faut-il que les critères de ces évaluations répondent aux objectifs respectivement des universités et des EPST concernés. Il serait sans doute trop compliqué de demander à l'AERES de mettre en œuvre toute une batterie de critères spécifiques, d'autant que l'agence d'évaluation est encore en phase d'apprentissage et à du mal à produire l'évaluation moyenne et « généraliste » de toutes les différentes structures de recherche qu'elle a pris en charge. Dans ce processus universités et EPST sont donc fondés à conserver leur propre système d'évaluation, en spécifiant le rôle dévolu à l'évaluation AERES. Cette articulation complexe est encore en train de se mettre en place. La participation de membres du comité national du CNRS et des sections du CNU facilite le processus, tout comme les échanges existant sur les classements et listes d'identification des revues du champ. Mais certaines initiatives de l'AERES, donnant au-delà des avis circonstanciés, des notes rendent au contraire plus délicate cette articulation. Les délibérations des sections du Comité National du CNRS intègrent comme un élément impor-

tant le rapport de l'AERES dans leur évaluation des structures mais conservent leur libre arbitre pour ajuster les critères aux missions et objectifs scientifiques du CNRS. Le poids des évaluations de l'AERES reste important dans les arbitrages entre disciplines que doivent réaliser de façon concertée universités et CNRS dans le cas des chaires ou des détachements par exemple. Il est en particulier important de souligner ici que l'économie- gestion apparaît à l'AERES comme étant la discipline la plus « sévère » à l'égard de ses équipes : 12,5 % classés A+ dans la vague C (contre 16,2 % pour l'ensemble des SHS et 25 % pour Sciences Politiques et sociologie par exemple), 4,2 % de A (resp. 28,9 % pour SHS et 21,4 % pour Sciences Politiques et sociologie), 41,7 % de C (resp. 14,6 % et 17,9 %) !

Dans l'évolution des pratiques d'évaluation, le cas particulier des établissements de gestion est intéressant à observer. Depuis plusieurs années, on y observe, en effet, au niveau international, le développement grandissant de systèmes d'accréditation des business schools (AACSB, Equis...) qui court-circuitent complètement les processus nationaux. Par contre, il est intéressant de souligner que tous ces mécanismes d'accréditation font une large part à la recherche et pèsent considérablement sur la stratégie de tous les établissements, y compris les plus modestes, à développer des programmes de recherche ou plutôt, dans de nombreux cas, à mettre en place des stratégies actives de publications.

Mais au-delà de ces évaluations spécifiques et de leur coordination c'est une réflexion sur le rôle attendu et les positionnements respectifs des différentes structures de recherche qu'il serait souhaitable de développer. Dans le contexte actuel, plusieurs registres semblent contribuer à une telle structuration : les programmes d'enseignement – notamment de Masters – et la structuration des équipes.

L'identification des laboratoires et unités comme élément clé des dispositifs de recherche est une des spécificités des modèles européens. Elle se démarque en particulier de l'organisation en place dans de nombreux pays comme les États-Unis et qui favorisent

plutôt la structuration de départements d'enseignement-recherche auxquels se rattachent de manière automatique les enseignants-chercheurs.

En France, c'est autour de la constitution de laboratoires et de plates-formes de recherche (équipements et instruments) que s'est construit la spécificité du CNRS et sa capacité à porter des champs de recherche émergents. On peut d'ailleurs avancer sans grand risque d'erreur que c'est même cette capacité à penser l'organisation de la recherche de manière collective qui a permis, historiquement, de bénéficier d'économies d'échelle en maintenant la France au meilleur niveau malgré des moyens limités par nature.

À la faveur des mutations récentes (autonomie des universités, ANR et AERES), c'est cependant le rôle du CNRS, tout autant que la nature et le type de structuration des collectifs de recherche qui est mis en question. L'organisation des unités traditionnelles de recherche, dont la taille était de l'ordre de quelques dizaines de chercheurs, se trouve en effet mise en cause d'un côté par le poids de département s d'économie ou de gestion regroupant de manière indifférenciée chercheurs, enseignants-chercheurs et enseignants ; de l'autre côté par des pôles ou clusters scientifiques d'éco-gestion (par exemples les RTRA) dépassant le cadre classique des institutions existantes : c'est par exemple le cas de l'École de Paris d'économie ou la Toulouse School of Economics. Face à ces évolutions. C'est donc bien le paradigme de l'organisation de la recherche qui se trouve en cause et, très concrètement ; le modèle et la cartographie idéale des laboratoires associés au CNRS. S'agit-il de favoriser une structuration de la recherche en économie et gestion autour d'une vingtaine de laboratoires de référence généralistes et couvrant tous les champs de l'économie et la gestion (de l'ordre de un par région) ou faut-il au contraire ou aussi favoriser la spécialisation d'équipes autour de leurs domaines d'excellence, en visant alors plutôt plusieurs dizaines d'unités construites sur des centrages thématiques et orientés autour de projets identifiés...

Sans trancher ici entre ces différentes perspectives, il faut souligner que chacune des options peut donner au CNRS un rôle favorisant innovations et interdisciplinarité selon des modalités différentes.

Si certains établissements déploient des stratégies volontaristes dans nos disciplines (fléchage de programmes, postes...), l'existence d'instances nationales telles que le CNRS ou son INSHS demeure de particulière importance pour contribuer à identifier les cibles des programmes scientifiques dans une perspective pluridisciplinaire, pour favoriser la structuration de laboratoires ou réseaux pluri-établissements, pour contribuer à réduire les inégalités en termes de ressources humaines et les risques de criticité de certaines composantes de la discipline susceptibles d'être défavorisées dans certaines stratégies.

Notons que ce rôle de rééquilibrage du CNRS paraît parfois d'autant plus nécessaire que la réforme des commissions de recrutement à l'université conduit, dans beaucoup de cas, à rendre encore plus difficile la mobilisation d'avis extérieurs dans la prise de décision. Indépendamment de la volonté des établissements, la démultiplication mécanique du nombre de ces comités (organisés au cas par cas pour les différents postes) empêche en effet un investissement dans la durée de compétences externes aux établissements. Le second facteur important de structuration de la recherche tend de plus en plus à résider dans l'organisation de programmes d'enseignement au niveau Graduate, en un mot des Masters. Ils bénéficient en effet du poids de plus en plus fort attaché par les établissements à ce type de formation, des capacités d'autofinancement que ces programmes peuvent permettre (en les couplant par exemple à des soutiens industriels ou à des programmes de formation continue), et du facteur d'attractivité qu'ils offrent pour les laboratoires, en permettant notamment une meilleure sélection en amont des futurs doctorants. En permettant un ciblage thématique pointu et des partenariats d'enseignements complémentaires des activités de recherche, les Masters apparaissent désormais comme une composante à part entière de la vie des équipes.

## 2.4 ÉCONOMIE ET SCIENCES DE GESTION AU CNRS : UNE ALLIANCE SCIENTIFIQUE ET... DE RAISON

Depuis sa création, le contour de la section 37 fait régulièrement l'objet d'interrogations, de la part des économistes tout autant que des gestionnaires. Les sciences économiques et de gestion ont été regroupées dans cette section du fait de la proximité de leurs objets et de certaines de leurs méthodes et questionnements : qu'il s'agisse de la théorie du consommateur, de l'étude des outils de la finance ou des stratégies compétitives par exemple. Mais ces recoupements sont loin d'être complets et la question de leur « séparation » au CNRS et à l'AERES est épisodiquement soulevée par tel ou tel. En effet, les deux disciplines conservent des traditions, des communautés scientifiques, des trajectoires de développement et des perspectives spécifiques qui expliquent aussi bien que les deux disciplines continuent d'appartenir à des sections distinctes du CNU et qu'elles connaissent des dynamiques différentes dans ces deux espaces universitaires et CNRS. Alors que les sciences de gestion connaissent à l'université un développement plus soutenu porté par une forte demande étudiante et une capacité d'articulation plus affirmée avec les enjeux industriels et socio-économiques, la situation semble quelque peu inverse au CNRS où l'économie reste dominante, en nombre d'unités et de chercheurs tout autant que par le degré d'internationalisation de ses publications. Ceci ne remet pas en cause la réunion des deux disciplines dans une même section mais nous invitent au contraire à tirer parti de ce mariage de raison qui devrait contribuer à stimuler le développement de chacune des deux composantes disciplinaires et à renforcer la dynamique d'innovation et d'interdisciplinarité que le CNRS est sensé impulser. Il s'agit bien de favoriser l'éclairage d'un même objet de recherche par des regards complémentaires et approfondis de deux disciplines connexes. L'avantage de cette interdisciplinarité de proximité est de faciliter l'ouverture de notre section à d'autres

collaborations et confrontations scientifiques. Cette capacité d'ouverture est une condition sine qua non d'une interdisciplinarité plus large avec nos collègues des « sciences sociales » – sciences politiques ou sociologie par exemple – tout autant que des « sciences exactes » sur les thèmes de l'environnement, de l'énergie, des STIC ou de la santé pour ne reprendre que les principaux champs de recherche qui sont l'objet des préoccupations des sociétés contemporaines.

Économie et sciences de gestion bénéficient tous deux de cette association. L'économie, en s'isolant des disciplines sociales connexes, prendrait le risque d'être sujet d'opprobre à l'occasion d'une crise financière et économique comme celle que nous traversons, où quelques visions simplificatrices des marchés, plus ou moins bien contextualisées, peuvent masquer l'ampleur des recherches sur le grand chantier permanent de construction des marchés qui accompagne internationalisation et changements techniques dans nos économies. Les sciences de gestion doivent trouver dans les pratiques de recherche des économistes des modes d'organisation et des outils leur permettant à la fois certaines généralisations des analyses en contexte qu'ils opèrent comme l'opportunité de caractériser les conditions macroéconomiques dans lesquelles se situent leurs objets.

En pratique, tirer parti le meilleur parti de la proximité de ces deux disciplines et favoriser de telles coopérations et regards croisés ne peuvent relever du seul affichage d'une section commune au CNRS et à l'AERES. Les critères d'évaluation doivent pouvoir et savoir tenir des différents types de recherche dans les financements de projets ANR par exemple ; l'institution CNRS elle-même doit aussi avoir à cœur de développer des laboratoires associant les deux disciplines, en assurant une meilleure harmonisation des recrutements et promotions et un meilleur équilibre dans les instances d'évaluation de tels laboratoires. Encore une fois, l'interdisciplinarité ne s'arrête pas là mais celle qui peut se nouer entre nos deux disciplines constitue une étape sans doute indispensable pour faciliter aussi celles l'économie

et la gestion doivent développer avec les autres sciences de la société pour répondre aux grandes questions et enjeux contemporains déjà mentionnés. Cette coopération entre sciences sociales connexes était d'ailleurs au cœur d'un découpage en sections qui avait été conçu en prévoyant que nombre d'unités ou d'équipes d'économie seraient rattachées aux sections de sociologie et de sciences politiques. Les pratiques des 15 dernières années de la direction scientifique et des sections ont conduit à limiter fortement de telles associations, faute d'avoir trouvé des outils d'évaluation et de structuration scientifique adaptés. Aujourd'hui, une nouvelle donne existe avec l'arrivée de l'ANR et de l'AERES, comme la place que sont appelées à prendre les universités dans la programmation scientifique. Elle crée une dynamique d'ouverture de nos disciplines à des collaborations avec d'autres disciplines, et en tout premier lieu celles qui nous sont connexes. Le mouvement de restructuration de la recherche en cours vise à faciliter ces coordinations entre SHS pour que les disciplines de l'économie et de la gestion puissent contribuer aux ambitions que nos sociétés développent à leur égard en matière d'environnement, de santé, d'énergie... Les débats sur les orientations du Grand Emprunt, sur les développements des Campus ou sur le développement à venir des laboratoires d'excellence font largement ressortir l'importance d'une recherche interdisciplinaire adéquatement structurée. Le second rapport d'étape du CDHSS aborde d'ailleurs explicitement ces questions. La mise en œuvre de l'Alliance SHS pose justement la question de cette coordination : il indique clairement que loin de se cantonner à favoriser de seuls échanges intra-SHS, le succès d'une telle Alliance devrait plus largement se mesurer à sa capacité de déboucher sur des coopérations avec les autres Alliances (en matière d'énergie, de santé, d'environnement). Une politique ouverte de la section aux coopérations avec les autres sciences sociales connexes dans le nouveau cadre d'évaluation et de structures mis en place par la loi de recherche de 2006 constituerait donc une réponse très concrète pour permettre à la recherche en économie et gestion de fournir et valoriser des

contributions significatives à l'appréhension des questions majeures auxquelles sont présentement confrontées nos sociétés.

Dans l'ensemble de ces évolutions, la communauté des économistes et une grande partie de celle des gestionnaires souhaitent une implication forte du CNRS.

### 3 – UNE DÉMOGRAPHIE INQUIÉTANTE

Le nombre d'unités liées en principal à la section 37 a décliné de moitié dans la dernière décennie. Aux flux habituels de créations/destructions d'unités, s'est rajoutée la volonté de la direction du CNRS de constituer des unités de plus grande taille, par la fusion d'UMR entre elles ou avec des équipes d'accueil, parfois sur des sites distants comme ce fut le cas avec les unités de Rennes et Caen, qui forment l'UMR CREM. Malgré cette réduction, une majorité d'unités n'a pas connu de densification de leur effectif de chercheurs CNRS. En effet dans le même temps, le nombre de chercheurs a décliné. En 5 ans, les effectifs payés par le CNRS ont baissé de 10%, passant de 205 à 183 chercheurs CNRS.

Pourtant, l'attractivité du CNRS ne se dément pas, notamment en économie. La section comme jury d'admissibilité constate un niveau remarquable des candidats. En particulier, les concours CNRS permettent à la recherche française de recruter des chercheurs de haut niveau qui souhaitent se concentrer quasi-exclusivement à leur recherche en début de carrière. Les concours attirent aussi beaucoup de candidats en provenance de l'étranger séduits par la liberté de recherche. Pour les non-francophones, le CNRS représente l'opportunité de venir en France sans avoir à assurer des cours qui demeurent dans la plupart des universités ou grandes écoles essentiellement en langue française. Les salaires offerts en début de carrière pour

des profils de ce niveau restent très loin des normes en vigueur à l'étranger, en particulier en sciences de gestion mais les atouts du CNRS et les mesures timides d'amélioration des carrières des chercheurs visant à en renforcer l'attractivité permettent encore, jusqu'à présent, de recruter des chercheurs de très grande qualité.

Il y a un paradoxe entre ces dernières mesures et une politique de recrutement particulièrement malthusienne entre 2007 et 2010, politique qui menace à terme la présence du CNRS dans les équipes de sciences économiques et de gestion, présence pourtant essentielle à la recherche française.

### 3.1 LA SITUATION ACTUELLE DES UNITÉS DE RECHERCHE

Il est relativement délicat de dresser un panorama des unités de la section sans être par trop réducteur tant elles présentent de diversité : des unités généralistes de grande taille (pour la section) regroupant une centaine de chercheurs et enseignants-chercheurs côtoient des unités très spécialisées comptant moins de 20 membres. Selon que l'on se focalise sur tel ou tel facteur, les regroupements que l'on peut être amené à effectuer se disloquent rapidement. De même, les informations que l'on peut retirer des moyennes de personnels chercheurs et ITA sont extrêmement trompeuses, les distributions étant très asymétriques.

À la fin mai 2010, la section 37 regroupait 26 laboratoires (22 UMR, 2 FRE et 2 EAC, cf. tableau 2) au titre de leur rattachement principal, soit 5 de moins qu'en mai 2006. Par ailleurs, 1 FR, 1 IFR et 2 UMS dépendent aussi de la section. Ces unités représentent, d'après les données extraites de LABINTEL et ne prenant pas en compte les émérites et les agents en sortie temporaire (détachement, disponibilité, congé parental...), un potentiel de 166 chercheurs CNRS, 1 446 enseignant-chercheurs et chercheurs d'autres organismes, 122 ITA CNRS

et 131 IATOS et IT d'autres organismes. Quelques uns de ces 166 chercheurs ne dépendant pas de la section pour leur évaluation mais sont affectés dans nos laboratoires, du fait de l'interdisciplinarité de leurs travaux. Réciproquement, des chercheurs CNRS dépendant de la section 37 sont aussi affectés dans l'une des nombreuses unités ayant un rattachement secondaire à la section, principalement au sein de l'Institut des SHS mais aussi en mathématiques, informatique ou chimie. Au total, en sus des unités de services ou des GDR, la section 37 est section secondaire d'une trentaine d'unités de recherche.

La faiblesse de la proportion de chercheurs CNRS (11,5 %) dans les unités de la section, si elle n'est pas récente en économie et en gestion, s'intensifie ces dernières années alors même que le nombre d'unités rattachées au CNRS a fortement diminué. Les ITA CNRS représentent encore près de la moitié des personnels de soutien des équipes mais ce chiffre est en trompe-l'œil si l'on considère qu'en 2001, leur proportion était de 2/3. Le rapport Paris/province est légèrement déséquilibré, avec 11 unités dans la région parisienne qui regroupent près de 60 % des chercheurs CNRS.

Les unités sont pour la plupart adossées aux facultés de sciences économiques de leur(s) université(s) de tutelle et se veulent relativement généralistes. Celles qui n'atteignent pas une très grande taille présentent souvent une spécialisation sur quelques domaines d'excellence, thématiques ou méthodologiques, voire une unique spécialisation. Le cas des unités de gestion est un peu différent, le modèle en vigueur voulant que l'ensemble des spécialités de gestion (5) enseignées à l'université soient couvertes, même quand les équipes sont de taille réduite. L'affichage économie-gestion de la section se retrouve dans l'existence d'équipes regroupant économistes et gestionnaires, une pluridisciplinarité qui s'étend même au droit dans le cas de l'UMR GREDEG. La tutelle universitaire est largement dominante pour les laboratoires de la section mais n'est pas un modèle absolu. Plusieurs équipes sont aussi rattachées à l'INRA et d'autres n'ont aucune tutelle universitaire et

sont adossées à des grandes écoles, d'ingénieur (École polytechnique, ENPC) ou de commerce (HEC) ainsi qu'à l'INSEE.

En moyenne, une unité en principal de la section 37 est dotée de 7 chercheurs CNRS mais la section présente une concentration du potentiel sur un petit nombre d'unités : les 5 plus grosses UMR regroupent plus de la moitié des chercheurs. Par ailleurs, alors même que le nombre d'unités de recherches de la section a fortement diminué ces dernières

années, la majorité des unités reste dans une situation critique vis-à-vis du nombre de chercheurs qu'elles hébergent. Près de 50% des unités ne disposent que de 3 chercheurs CNRS ou moins et, si leur présence est souvent vécue comme extrêmement structurante pour l'activité de recherche, ce petit nombre de chercheurs rend très délicat la gestion des départs pour ces équipes, que ce soit les départs en retraite, les disponibilités ou les mutations.

**Tableau 2. Liste des unités de recherche en principal de la section 37 (fin mai 2010)**

Code	Laboratoire	Tutelles
UMR 7522	BETA – Bureau d'économie théorique et appliquée	Université de Strasbourg – Université Nancy 2
FRE 3256*	CEPN – Centre d'économie de Paris Nord	Université Paris 13
UMR 5820	CERAG – Centre d'études et de recherches appliquées à la gestion	Université Grenoble 2
UMR 6587	CERDI – Centre d'études et de recherches sur le développement international	Université d'Auvergne – Clermont Ferrand 1
UMR 8174	CES – Centre d'économie de la Sorbonne	Université Paris 1
UMR 8568	CIREN – Centre international de recherche sur l'environnement et le développement	ENPC Paris – EHESS – Agro-ParisTech – CIRAD – Météo France
UMR 6211	CREM – Centre de recherche en économie et management	Université Rennes 1 – Université de Caen
EAC 7181	CRM – Centre de recherche en management	Université Toulouse 1
UMR 7088	DRM – Dauphine – recherches en management	Université de Paris Dauphine
FRE 3257*	EconomiX	Université Paris 10 – Nanterre
EAC 5032	ERMES – Équipe de recherche sur les marchés, l'emploi et la simulation	Université Paris 2
UMR 5824	GATE – Groupe d'analyse et de théorie économique	Université Lyon 2 – Université de Saint-Étienne – ENS Lyon
UMR 2773	GRECSTA – Groupe de recherche en économie et statistique	INSEE
UMR 6227	GREDEG – Groupe de recherche en droit, économie et gestion	Université de Nice Sophia Antipolis
UMR 2959	GRÉGHEC – Groupement de recherche et d'études en Gestion à HEC	HEC
UMR 5604	GREMAQ – Groupe de recherche en économie mathématique et quantitative	Université Toulouse 1 – INRA
UMR 6579	GREQAM – Groupement de recherche en économie quantitative d'Aix-Marseille	Université Paul Cézanne – Aix Marseille III

Code	Laboratoire	Tutelles
UMR 5113	GREThA – Groupe de recherche en économie théorique et appliquée	Université Bordeaux 4
UMR 5474	LAMETA – Laboratoire montpellierain d'économie théorique et appliquée	Université Montpellier 1 – ENSA Montpellier – INRA
UMR 5118	LEG – Laboratoire d'économie et de gestion	Université de Bourgogne
UMR 8179	LEM – Lille – économie et management	Université de Lille
UMR 6221	LEO – Laboratoire d'économie d'Orléans	Université d'Orléans
UMR 5252**	LEPII – Laboratoire d'économie de la production de l'intégration internationale	Université Grenoble 2
UMR 8545	PJSE – Paris Jourdan sciences économiques	EHESS – ENS Paris – INRA – ENPC Paris
UMR 7176	PREG – Pôle de recherche en économie et gestion de l'École polytechnique	École Polytechnique
UMR 8184	THEMA – Théorie économique, modélisation et applications	Université de Cergy – Pontoise

\* Le CSD de septembre 2010 a acté le retour en UMR de cette unité

\*\* Cette unité devrait passer en FRE à 1 an suite au CSD de septembre 2010

### 3.2 LA POLITIQUE D'EMPLOI ET SON IMPACT SUR LA DÉMOGRAPHIE DES ÉQUIPES

Si la situation actuelle des unités de la section est très disparate et déjà critique en termes de personnel CNRS, elle ne devrait pas s'améliorer dans les prochaines années. La moyenne d'âge des chercheurs n'est pas très élevée (49 ans) mais, une fois encore, ce chiffre cache une réalité plus complexe : la pyramide des âges a une structure bimodale, avec un pic autour de 40 ans et un autre autour de 60 ans. Au cours des 4 prochaines années 23 chercheurs fêteront leur 65<sup>e</sup> anniversaire. Même en considérant le fait que les chercheurs ne prennent leur retraite qu'une fois la limite d'âge atteinte (l'âge moyen de départ à la retraite est de 64,85 ans dans la section et la politique actuelle du CNRS est de ne pas accorder une prolongation d'activité), la politique de non-remplacement de l'ensemble des départs à la retraite est susceptible d'entraîner la disparition des chercheurs CNRS dans plusieurs

unités. L'absence de lissage et de prospective subits ces dernières années soulèvent un autre problème de taille : en 2015, 12 départs en retraite sont prévus sans compter sur les départs naturels que subit régulièrement la section avec les chercheurs passant professeurs par le biais des concours d'agrégation de l'enseignement supérieur. Si les postes ne sont pas renouvelés les effectifs de la section risquent donc d'atteindre un niveau critique, risque qu'il convient d'anticiper. Mais, même dans l'hypothèse favorable où les postes seraient mis au concours, un lissage temporel serait nécessaire pour garantir une qualité constante des concours.

Compte tenu de la faiblesse des recrutements de CR en section 37 ces dernières années (5 pour les concours 2005 à 2007 puis 4 en 2008 et 3 en 2009 et 2010 (6)) et de l'absence de visibilité concernant le nombre de postes ouverts aux concours, il apparaît clairement qu'une prospective de laboratoire basée sur des recrutements CNRS est illusoire. Pour la plupart des unités, le souci immédiat est de gérer le vieillissement des équipes et de compenser les départs pour assurer la pérennité des

thématiques de recherche du laboratoire avec un recrutement universitaire plutôt axé sur le renouvellement des équipes existantes et l'adéquation avec la demande d'enseignement. Dans les laboratoires qui ne sont pas adossés à une tutelle « d'enseignement », le poids des chercheurs CNRS est généralement plus important et leur renouvellement essentiel.

En outre, les chercheurs et enseignants chercheurs devront faire face à d'importants départs à la retraite des personnels qui les soutiennent dans leurs recherches. Le taux de départ des IT CNRS (Ingénieurs, Techniciens et administratifs) est plus de trois fois supérieur au taux de départ des chercheurs CNRS. En 2015, c'est en principe un quart des IT CNRS actuels qui auront quitté leur laboratoire. La politique d'emploi et de renouvellement des postes sera donc déterminante, notamment en matière d'appui direct à la recherche (50 % des IT CNRS en BAP D ont plus de 55 ans).

Ce choc démographique sera d'autant plus prégnant que l'environnement des chercheurs et enseignants chercheurs en Economie et Gestion est déjà critique. En effet, ceux-ci bénéficient d'un appui particulièrement faible. Ainsi, un chercheur ou enseignant chercheur affecté dans une unité de recherche de la section ne bénéficie que d'un peu plus de 270 h par an de soutien de toute nature (administratif et financier, informatique, méthodologique et documentaire) de la part de l'ensemble des tutelles et partenaires (CNRS, Universités...). Chaque chercheur ou enseignant chercheur est soutenu en moyenne par seulement 0,17 personnel technique (IT CNRS, ITRF, BIATOS, etc.). En particulier, le soutien

direct à la recherche peut être considéré aujourd'hui comme dérisoire (50 à 110 h par an par enseignant chercheur ou chercheur), et ne représentera qu'une soixante d'heures en 2015 si les départs des professionnels en documentation, statistiques et sciences sociales ne sont pas renouvelés.

Dès lors, une véritable réflexion sur le soutien technique dont doit bénéficier les chercheurs et enseignants chercheurs apparaît comme une nécessité impérieuse ; d'autant plus que le choix (ou plutôt non choix) d'une forte proportion de professionnels en gestion et pilotage de la recherche risque d'être problématique avec la mise en place de la Délégation Globale de Gestion.

C'est donc l'ensemble de la politique IT qui devra être repensée à brève échéance afin de préserver les capacités et le potentiel de recherche des laboratoires en Economie et Gestion. La section du CoNRS, en particulier les élus C, devrait être associée à cette réflexion.

Au total, la surface géographique et le poids du personnel CNRS ont été amputés dans la section 37 dans la dernière décennie. À terme, il y a un risque réel que certaines thématiques soient finalement abandonnées dans les unités d'économie et de gestion, non seulement au CNRS mais aussi à l'Université. En outre, le lien entre les unités et le CNRS est susceptible de se distendre de par la simple disparition des chercheurs CNRS dans les universités. C'est d'autant plus critique en sciences de gestion, où les effectifs sont déjà très limités mais jouent un rôle essentiel dans un champ encore en voie de structuration.

## Notes

(1) D'autres UMR comme celles liées à TSE disposent aussi de tels laboratoires.

(2) Ce qui signifie qu'il n'existe plus de pôles d'expertise utilisés (utilisables) par les décideurs (demande sociale), rôle qu'ont joué les anciennes unités CNRS (CRESGE, CREGAS, LASS).

(3) Il s'agit du CREGAS. La deuxième – le CERMES – est rattachée à titre secondaire à la section 37.

(4) Au-delà des effets attendus de la structuration en instituts (effets plutôt de pluridisciplinarité (cf. [http://www.cnrs.fr/comitenational/cs/groupe/groupe\\_interdisciplinarite.pdf](http://www.cnrs.fr/comitenational/cs/groupe/groupe_interdisciplinarite.pdf)), le

CNRS développe des programmes interdisciplinaires spécifiques <http://www.cnrs.fr/prg/PIR/presentation.htm>.

(5) Si l'on se réfère aux options ouvertes aux candidats du dernier concours d'agrégation pour la leçon de spécialité, les champs de recherche en gestion sont : la comptabilité et le contrôle de gestion, la finance, le marketing, la gestion

des ressources humaines, la gestion de production et logistique, la gestion des systèmes d'information et de communication, la gestion juridique et fiscale et le management stratégique.

(6) Un poste supplémentaire de CR a finalement été attribué à la section 37 pour le concours 2010 lors des ultimes arbitrages.



## SOCIÉTÉS ET CULTURES : APPROCHES COMPARATIVES

### *Présidente*

Chantal BORDES-BENAYOUN

### *Membres de la section*

Dionigi ALBERA

Jean-Pierre ALBERT

Michèle BAUSSANT

Jean-Luc BONNIOL

Marc BORDIGONI

Jacky BOUJU

Rita-Danielle BRESEGHELLO

Elisabeth CLAVERIE

Jean-Paul COLLEYN

Benoît FLICHE

Corinne FORTIER

Yves GOUDINEAU

Anne Yvonne GUILLOU

Sophie HOUDART

Odile JOURNET-DIALLO

Olivier LESERVOISIER

Charles RAMBLE

Sandrine REVET

Gilles TARABOUT

La section 38 s'inscrit, comme son libellé l'indique, dans une démarche comparative de connaissance des sociétés et cultures. Elle associe principalement des anthropologues, mais aussi des spécialistes de sociologie des religions. C'est donc avant tout à la situation actuelle de l'anthropologie que le présent rapport se consacre, à partir de l'observatoire privilégié sur la diversité des recherches en cours que constitue le Comité national du CNRS.

### **L'anthropologie, une discipline à la fois bien ancrée dans son héritage et soucieuse de comprendre le monde contemporain**

La notion de culture, catégorie centrale de la discipline, a certes été fortement contestée durant toutes ces dernières années, les attaques se concentrant sur sa réification toujours possible, ainsi que sur sa description en tant que totalité intégrée s'imposant aux individus. La discipline a réagi à cette remise en cause sur plusieurs fronts : de plus en plus monte dans les analyses, comme c'est d'ailleurs le cas dans les autres sciences sociales, la capacité du sujet à agir (*agency*) à l'intérieur de normes culturelles conçues comme plus flexibles : les subjectivités – et intersubjectivités – deviennent dès lors une préoccupation centrale. D'autre part, aujourd'hui confrontée à des cultures de plus en plus entourées des discours qu'elles pro-

duisent sur elles-mêmes, elle doit tenir compte de cette dimension réflexive, en ayant largement recours à des matériaux relevant de l'écrit, ce qui enlève une part de sa prééminence au matériau classique que représentaient pour elle la « parole » et les données orales. Elle doit aussi être de plus en plus attentive à la réception de ses propres analyses sur les terrains qu'elle étudie. Le terme de « culture » servant notamment à désigner, dans le langage commun, une catégorie d'objets porteurs de valeurs collectives qui peuvent être gérés dans le cadre d'institutions, voire de politiques publiques, dont elle peut être elle-même l'inspiratrice (l'« institution de la culture »), elle ne peut que prendre acte de cette double dimension réflexive et de sa propre contribution à l'élaboration de ces objets. Elle doit enfin se situer par rapport aux prolongements savants fondés sur la saisie d'entités culturelles prises dans leur spécificité (*cultural studies*) en affirmant, sans nier l'intérêt qu'ils peuvent revêtir, ses exigences propres, relevant en particulier d'un comparatisme raisonné.

Les avancées théoriques les plus significatives se sont nourries de l'examen et de la mise en rapport de matériaux ethnographiques suffisamment fins et détaillés pour, d'une part interroger des catégories ou des typologies communément utilisées dans l'analyse de faits sociaux les plus divers (y compris dans notre société) et, d'autre part, lutter contre le risque permanent de substantialisation de ces catégories. Le retour périodique sur le terrain donne aux ethnologues une position privilégiée pour saisir, à partir d'une familiarité déjà acquise et du point de vue des acteurs locaux, certaines modalités d'une histoire en train de se faire (ou de se défaire). De même, le recours à différentes échelles d'observation, au principe de variation et au comparatisme constitue un des fondements de la discipline, soucieuse d'appréhender des aspects très différents de la réalité sociale, tout en rendant compte de leurs interrelations et de leur complexité.

## De l'inventaire des différences à leur mise en relation et leur mise en perspective

La vocation de l'anthropologie à saisir, sur une trame commune, la singularité des sociétés et des cultures dans toutes les aires géographiques trouve aujourd'hui ses prolongements dans la réflexion qu'impliquent les mutations du monde global. Tout en reliant davantage les hommes par le développement des communications, elles ont contribué à la reformulation des traditions et cultures locales et souvent à des revendications identitaires plus exigeantes. Le monde contemporain connaît une tension entre l'uniformisation mondiale des cultures et la prédominance des modèles de production et de consommation de l'économie de marché d'un côté, la tendance à la réaffirmation des identités collectives particulières, voire à la formation de nouvelles identités et à la réactivation des mémoires, de l'autre. Cette tension entre local et global invite à revisiter les théories anthropologiques et à élaborer de nouveaux objets.

La question du **rapport à l'autre**, qui est au cœur de la discipline, constitue l'une des questions clés de notre époque. Les échanges sociaux s'établissent sur de nouvelles échelles et leur organisation, leurs ajustements et adaptations sont une source d'investigation et de renouvellement du questionnement sur ce qui fait société. Les déplacements humains ont pris de nouvelles directions, la rencontre des peuples emprunte de nouvelles voies. Mais ces circulations, dans lesquelles une vision postmoderne a pu voir une forme d'aventure et de liberté, ne doivent pas masquer les contraintes, les enfermements et les replis. Il s'agit aujourd'hui de mieux comprendre les caractéristiques et conditions des échanges, sans irénisme c'est-à-dire y compris dans leur dimension de violence et de rejet, d'exclusion économique ou de racisme. De telles questions sont familières à l'anthropologie depuis toujours, mais elles sont particulièrement aiguës aujourd'hui et confèrent à la discipline une responsabilité particulière dans le projet de leur élucidation.

1. En observant les sociétés dans leur diversité, l'anthropologie appréhende les **migrations** humaines sous un angle original et complémentaire de celui des autres disciplines. Les migrations entraînent en fait une irruption de l'altérité, autrefois lointaine, dans le monde proche. C'est donc autour du déplacement des **figures et des frontières de l'altérité** que s'organise aujourd'hui l'approche anthropologique, qui appréhende non seulement le déplacement des hommes, mais aussi la circulation des objets et des savoirs. Se référant à une longue tradition intellectuelle qui, depuis Bastide, s'attache à comprendre les relations de proximité et de distance entre «étrangers» et «autochtones», entre «l'autre» et le «même», elle entend éclairer les multiples modalités individuelles et résonances collectives de la mobilité et de la rencontre et éventuellement du mélange des cultures. Elle envisage la migration comme une expérience individuelle et collective qui affecte les lieux de départ et d'arrivée, d'installation ou de transit, d'exil et de retour. Elle prend en compte la part subjective des parcours, le sens que les hommes lui donnent, les activités qu'ils conduisent et l'horizon de leurs espoirs, de leurs mythes et des liens qu'ils cultivent avec d'autres.

Mais elle scrute aussi, dans les pays d'arrivée, les mécanismes au travers desquels les migrants sont affectés à une place particulière. Conséquence de la distance culturelle par rapport à la société d'installation et d'une plus grande «visibilité» des minorités, une grande partie des nouveaux migrants, notamment ceux originaires des «Suds», peuvent être confrontés à la question du racisme et à différentes formes de discrimination, la question sociale des inégalités semblant passer au second plan derrière la montée de clivages liés à l'origine ou à la religion que la résurgence de la mémoire coloniale contribue aujourd'hui à révéler, confortée par la popularisation du nouveau paradigme de la «reconnaissance». Ces situations donnent lieu, selon les pays, à des modes de gestion politique fondamentalement différents, qui tous mettent en tension la liberté de choix des individus par rapport à des groupes pouvant imposer à leurs membres des obligations collectives empiétant sur les droits

individuels et rendant problématique l'existence de valeurs communes, en particulier en ce qui concerne les frontières établies entre les sphères privée et publique, notamment en matière religieuse.

Ces situations sont toutefois également marquées par le phénomène de l'interpénétration sociale et culturelle, dans le cadre d'un réseau d'échanges mondialisé où, si les hommes sont souvent arrêtés aux frontières, circulent en permanence les produits et les idées, alimentant la critique d'une conception par trop holistique de la culture. Le vieux mot «acculturation», qui connote un certain déséquilibre dans les contacts, aboutissant à un constat de perte, d'érosion, pour l'une des parties est aujourd'hui largement abandonné. Le terme de syncrétisme semble avant tout réservé au domaine religieux, alors que la métaphore mécanique du «bricolage», tout comme celle du «branchement», réfèrent clairement à l'ajustement d'éléments disparates; l'extension métaphorique de la notion de *métissage* au domaine culturel est souvent proposée mais peut comporter une ambiguïté. Le concept de *créolisation* connaît aujourd'hui un développement hors de son territoire originel : il renvoie à une certaine manière de gérer une diversité première et le rapport à l'Autre qu'elle implique, ainsi qu'à la fluidité de nouveaux assemblages culturels qui se déploient dans ce qu'on peut appeler un *continuum*, au long duquel se déploient toute la complexité et la plasticité des insertions individuelles. Les sujets semblent y bénéficier d'une certaine marge de liberté, dans la mesure où ils ont la possibilité de choisir, en fonction des contextes, dans une palette diversifiée de modèles de conduite, au sein desquels peuvent affleurer les contenus de conscience propres à toute identification (sur la base d'alignements ethniques ou, au contraire, de l'affirmation d'une unité locale).

Ce domaine a bénéficié d'un renouvellement théorique avec les discussions autour des catégories distinctives, en particulier celles liées aux **phénomènes ethniques**, et de diverses notions connexes (minorités, diasporas, autochtonie, multiculturalité, «diversité»...). Ce renouvellement implique une

prise en compte des subjectivités engagées dans un processus dialectique : les catégories ethniques ou « raciales », même si elles sont imposées du dehors par assignation, sont en effet simultanément et continuellement créées du dedans, expression de la façon dont un agrégat d'individus minorés peut se définir en tant que groupe contre un système d'oppression. L'affirmation des situations multiculturelles dans les sociétés contemporaines contribue en effet à exacerber cette tension dialectique entre assignation d'un côté, auto-identification de l'autre : un discours commun unit les acteurs sociaux opposés et le référentiel ethno-racial semble s'imposer à tous, livrant la vérité de l'évènement de manière univoque. Face à ces nouvelles séparations sociales, qui prennent le pas dans les consciences sur les vieilles divisions sociales horizontales, l'anthropologie est conduite à se garder nettement des risques d'essentialisation et de réification qui guettent le regard qu'on peut porter sur les identités collectives, alors qu'elles sont engagées dans une dynamique incessante d'élaborations, de contacts et de confrontations...

Aujourd'hui, de nouvelles formes migratoires se développent appelant un large renouvellement des recherches. Le profil des migrants s'est diversifié comme l'indique le nombre de catégories qui tentent d'en cerner les contours : réfugiés, exilés, nomades, immigrés, diasporiques, métis, transnationaux, élites circulantes, voyageurs, travailleurs saisonniers, touristes... Si les exodes forcés et les migrations de la pauvreté demeurent l'une des formes les plus importantes, ils touchent aujourd'hui tous les continents et ne se réduisent plus à un mouvement sud-nord. En l'espace de quelques décennies, l'Afrique, terre d'émigration, est devenue terre d'immigration et de circulations internes multiples. L'anthropologie sociale contribue efficacement à reproblématiser ces questions en articulant l'observation des migrants dans leurs divers contextes d'évolution, en particulier les relations qui lient les territoires d'origine et les espaces migratoires, ainsi que les reformulations culturelles, patrimoniales et identitaires qui les affectent. Elle offre à cet égard de précieuses possibilités de mise en perspective en prenant en compte,

avec toute l'attention qu'elles méritent, l'évolution des sociétés locales face au monde extérieur. A cet égard, les problématiques développées par l'anthropologie doivent pouvoir s'enrichir des enseignements de nouveaux terrains. Parmi les questions émergentes, on retiendra en particulier celle touchant aux circulations « immatérielles » déterritorialisées (rituels partagés sur le Net, réseaux diasporiques, tourisme virtuel etc.).

Le nombre de **femmes migrantes** ne cesse de croître- elles représentent désormais 50% des migrants internationaux à l'échelle mondiale – et leurs trajectoires spatiales, familiales et sociales apparaissent souvent spécifiques et riches d'enseignement sur les exclusions, mais aussi sur les formes de résistance et de créativité originales qu'elles développent. Plus généralement, les problématiques du **genre** sont désormais mieux prises en compte pour saisir l'expérience migratoire, au plus près des parcours individuels. Les migrations juvéniles de plus en plus fréquentes appellent également une anthropologie de la transmission, des ruptures et articulations à distance. Il importe d'analyser en effet les transformations qui affectent souvent le cœur même de la parenté, les valeurs familiales, les agencements de rôles et les modalités de transmission des cultures d'origine.

2. La **dimension religieuse et symbolique de la vie sociale**, les modes de constitution d'une sphère du « sacré », ou encore les modes de fabrique rituelle de l'homme et de la société, constituent un objet majeur de nos disciplines. La multiplicité actuelle des manifestations du religieux et ses enjeux sociaux mobilisent les chercheurs qui ont pu revisiter avec succès les modèles d'analyse fondateurs de l'anthropologie et de la sociologie des religions et produire de nouveaux cadres d'analyse. L'étude des formes religieuses prises par la mondialisation révèle de nouvelles configurations qui peuvent aller de l'atomisation infinie des pratiques et des identifications d'un côté à l'organisation transnationale des cultes de l'autre, en passant par diverses formes de transmission, de conversion, de passages. On ne peut comprendre la nature et les effets des

mutations que vivent de nombreuses sociétés non-occidentales en méconnaissant les sédiments (cultes, rites, interdits fondateurs) sur lesquels se superposent les montages de l'État, de la marchandise, des nouvelles technologies et des nouvelles religions. De nouvelles circulations réelle et virtuelle du religieux invitent à repenser les traditions et héritages, les itinéraires et les emprunts de cultes dans leur périmètre, leur définition et leur dynamique de reformulation. Dans cette perspective, on peut prendre l'exemple de la diffusion des cultes évangélistes ou bien encore celui des recompositions identitaires liées, entre autres, aux religions afro-américaines. On peut noter enfin les connexions du religieux aux grands courants culturels de la patrimonialisation des références identitaires et de la construction de mémoires souvent conflictuelles. Il s'agit là de nouveaux déploiements d'une modernité religieuse qui concerne de différentes manières toutes les grandes religions mondiales et dont les figures déjà bien identifiées – nouvelles formes de spiritualité, inventions rituelles, phénomènes de mobilité religieuse, articulations entre religion et ethnicité, entre religion et pouvoir – offrent un paysage mouvant qui impose de multiplier les études de cas et les approches comparatives. La nécessité de développer des recherches multi-sites dans ce domaine est impérieuse si l'on veut sortir des représentations stéréotypées et des visions schématiques.

Les rapports du religieux au culturel et au politique constituent un objet de renouvellement théorique particulièrement important dans un contexte de mobilisation du religieux dans les productions identitaires contemporaines. Le pluriel s'impose dans l'approche des religions instituées comme dans celle des nouveaux mouvements et expressions individualisées des croyances et s'impose d'autant plus pour les religions sujettes à une forte stigmatisation. Les oppositions traditionnelles entre orthodoxie et hétérodoxie, norme et dissidence sont remises constamment en question. Par ailleurs, la religiosité populaire trouve de nouvelles expressions. Quant aux hypothèses fondamentales, les travaux de la sociologie pragmatique, de l'anthropologie cognitive ou

de la psychanalyse invitent à renouveler l'étude d'objets traditionnels du domaine, tels la croyance ou le rituel.

**3. Les représentations et les usages publics du passé** – passé qui peut être constitué en ressource cognitive, argumentative, symbolique, affective, gisement susceptible d'être exploité pour les pensées et les actions et pouvant s'appuyer sur divers dispositifs et objets institués- sont devenues aujourd'hui particulièrement prégnantes. Le tropisme mémoriel contemporain semble en effet fortement corrélé avec l'affirmation croissante des identités particulières, dont les quêtes s'articulent à des mémoires spécifiques, qui peuvent se révéler concurrentes, voire conflictuelles, d'autant que, par l'adhérence du passé au présent qu'elles établissent, entraînant une reviviscence des affects, elles apparaissent comme une fabrique capitale de sentiments et d'émotions. L'anthropologie a aujourd'hui son mot à dire dans un débat jusqu'à présent largement dominé par les historiens. Elle se confronte, elle aussi, aux « guerres de mémoire », à l'instrumentalisation du souvenir et aux logiques accusatoires nées de l'appréhension du passé en termes purement moraux.

La multiplication des approches et des travaux sur la (les) **mémoire(s)** a contribué à la labilité des connotations attachées à ce terme. Dans une acception courante, la mémoire, tantôt définie comme une « faculté », tantôt comme un « contenu », est intrinsèquement liée à la notion du souvenir, au point de se confondre avec elle. Mais elle peut aussi qualifier un rapport particulier au temps, un mode distinctif de reconfiguration du passé à partir du présent spécifique à chaque ordre culturel. Deux grandes tendances peuvent être dégagées à partir de ces études, autour des traces et des effets du passé sur le présent, engageant l'hypothèse que le passé détermine au moins pour partie sa représentation, d'une part, et d'autre part sur l'idée de choix du passé, mettant l'accent sur un présent qui modèle le passé. L'une et l'autre ont au moins en commun leur emprunts disciplinaires pour saisir les phénomènes mémoriels contemporains – emprunt au vocabulaire de la psychanalyse avec la reprise, parfois qualifiée

et/ou revendiquée comme métaphorique et appliquée au collectif, des notions de «traumatisme», de «refoulement», d'«inconscient»; emprunts encore à l'analyse économique pour étudier l'évocation du passé comme relevant d'un champ concurrentiel, avec le développement des notions d'abus, de stratégies, de profits. Ce qui les rapproche aussi, à travers un grand nombre d'études, est *in fine* d'avoir appréhendé la notion de mémoire essentielle par le biais de ses manifestations publiques et de ses mises en récit, qui la placent dans une position concurrentielle – et contestée – par rapport à l'histoire en tant que discipline savante de restitution du passé, dans la mesure où ces narrations, évidemment non soumises à l'impératif de vérité et à l'exigence critique, sont souvent exhibées, très fortement idéologisées, et parfois politiquement instrumentalisées. Il s'agit là d'une forme de *connaissance du passé* (ce qui correspond à l'usage du terme par les historiens durant la période récente), qui ne relève pas d'une transmission verticale intergénérationnelle à l'instar d'un souvenir transmis, mais plutôt d'une communication horizontale, d'une *contagion des idées*, éventuellement cristallisée à partir des retombées de la production savante des historiens.

Longtemps confinée à une position d'étude plus ou moins secondaire dans les travaux ethnologiques portant sur la tradition orale, les représentations sociales et la culture, la mémoire constitue aujourd'hui un angle privilégié pour aborder deux problématiques à l'origine du questionnement anthropologique :

– à savoir d'une part, l'analyse des dynamiques par lesquelles une société se perpétue, change au cours du temps, comment elle transmet d'une génération à l'autre ses représentations. La mémoire peut en effet renvoyer d'abord à une persistance du passé, qui continue à innover le présent et à peser sur lui, tant dans la réalité du monde (en dehors donc de tout contenu mental : il s'agit là d'un héritage objectif) que dans la détermination des conduites des acteurs, largement en deçà de la conscience (il s'agit là d'une imprégnation psychique s'inscrivant dans les fondements même de la fabrique de la culture);

– d'autre part, la compréhension de la manière dont la discipline anthropologique, qui se fonde elle-même en partie sur la mémoire des autres comme matériau et sur la mémoire même de l'ethnologue, peut penser la question du passage de la mémoire individuelle à la mémoire sociale, des transferts entre la diversité des expériences singulières et leur mise en sens commune. La mémoire en effet représente à la fois un phénomène relevant du social et du psychisme individuel, et c'est cette articulation que certains anthropologues s'efforcent aujourd'hui plus spécifiquement d'explorer à travers notamment la compréhension des processus à la fois biologiques et culturels de l'apprentissage, de la conservation, de la restitution, ou à travers l'intérêt porté à la question des émotions.

Dans cette perspective, un axe de réflexion s'intéresse plus spécifiquement aux processus de transmission et aux structures de remémoration. En plaçant une approche interdisciplinaire, notamment entre psychologues cognitivistes et anthropologues, en particulier à propos de la mémoire à long terme, a pu être démontrée la nécessité de séparer plus clairement les narrations des mémoires et de distinguer entre se souvenir et évoquer, puisque l'absence d'expression publique n'équivaut pas à un oubli et que ces éléments non exprimés constituent potentiellement une ressource pour des représentations sociales futures. La mémoire et le savoir partagé peuvent ainsi se construire autour d'éléments qui restent implicites ou non-dits et l'oubli intervient de manière dynamique dans cette construction, comme un élément constitutif de l'élaboration collective d'une identité orientée davantage vers le présent et le futur que vers le passé.

La question du **patrimoine**, autre «machine temporelle» qui correspond à une affectation particulière de certaines traces, lorsque les objets rassemblés sous ce label (au terme d'une procédure de distinction) sont nimbés d'une aura mémorielle et basculent de leur ancienne valeur d'usage à une nouvelle valeur symbolique (marquée par leur ancienneté même et par le désir de transmission), n'a fait que croître durant ces der-

nières décennies, et le champ des objets bons à patrimonialiser que s'étendre : des monuments prestigieux aux paysages ou sites naturels ; des objets précieux à ceux ayant une simple valeur de témoignage sur la vie quotidienne traditionnelle. Alors que c'est d'abord l'État qui a été le garant de la distinction patrimoniale, ce qui a entraîné une certaine désresponsabilisation des acteurs locaux face à ce qui était considéré comme relevant de son domaine exclusif, des groupes divers se sont emparés d'objets, de lieux comme étant leurs biens propres, au cœur de la construction de leur identité. Davantage encore que chacun de ces objets de patrimoine pris isolément, c'est la « fièvre patrimoniale » elle-même et les supports qu'elle prend pour se dire qui deviennent aujourd'hui sujet d'étude. Mais la multiplication des patrimoines « vus d'en bas » n'empêche pas au patrimoine « vu d'en haut » de rester opérant. Les enquêtes se multiplient ainsi, qui décrivent les configurations sociales et culturelles et les ajustements complexes qui font aujourd'hui le patrimoine.

L'ethnologie a certainement contribué à cette prolifération des objets patrimoniaux, et à faire bouger la notion elle-même, en donnant toute sa place à l'immatériel : savoirs faire, gestes, jusqu'à installer un court-circuit temporel, lorsque la mémoire elle-même est patrimonialisée : le « traumatisme collectif » peut ainsi être constitué en patrimoine. La question des rapports qu'entretiennent par exemple des populations immigrées avec certaines traces de leur passé et le processus de patrimonialisation de leurs mises en récit par des « entrepreneurs de mémoire » constitue une problématique qui permet de réinterroger, sur la base d'analyses concrètes, le croisement entre les deux notions.

Mais on peut noter aussi le paradoxe, à l'heure du patrimoine immatériel, d'une certaine externalisation du processus mémoriel, avec le désir de l'appréhension directe et sensible du passé, de *re-présentation* du passé par le truchement d'une matérialité mobilisée, faite d'images, de matières et de textures, d'objets, de corps statiques ou en mouvement, tous ces éléments pouvant se configurer en scènes,

comme ces reconstitutions, généralement qualifiées d'historiques, qui se sont multipliées durant ces dernières années. De fait, le tourisme entraîne un élargissement des publics du patrimoine, qui fait se confronter un usage identitaire et un usage publicitaire du passé et met en tension une politique de l'identité à usage plus ou moins endogène et une politique d'image essentiellement vouée à l'attraction touristique. Les entreprises muséales constituent des occasions privilégiées pour saisir les dynamiques patrimoniales à l'œuvre tandis que sont étudiées de plus en plus finement les conséquences des procédures techniques récentes pouvant aboutir à des configurations sociales inédites (nouvelles technologies de l'information et de la communication, numérisation de collections, constitution de corpus, etc.). En matière d'art, ces études font apparaître les acteurs très différents, collectionneurs amateurs, ethnologues, conservateurs, critiques d'art, artistes, marchands, institutions culturelles, militants, qui cristallisent, autour des objets, une masse hétéroclite de savoirs, de pratiques, de représentations, de valeurs.

**4. L'anthropologie politique et juridique** se renouvelle, elle aussi, en complétant ses approches sur les représentations, les rituels et les symboles du pouvoir par des recherches attentives à l'action politique, aux rapports sociaux et aux impacts locaux de la globalisation. Les études récentes sur la décentralisation et la démocratisation permettent ainsi de s'interroger sur les échelles et modes de gouvernance, ainsi que sur l'étude des recompositions des pouvoirs locaux, marqués par l'intervention de nouveaux acteurs (migrants, ONG, « courtiers » du développement, coopération décentralisée...) et par l'enchevêtrement de différentes formes de légitimité, de normes juridiques et d'imaginaires politiques. Elles conduisent ainsi à dépasser une lecture verticale des rapports politiques en termes de « haut » ou de « bas », au profit de la nécessaire prise en compte des réseaux transnationaux.

L'anthropologie politique propose également une anthropologie renouvelée des insti-

tutions (tant nationales qu'internationales), afin d'en saisir la réalité concrète et en mesurer les effets à l'échelle locale. Dans cette perspective, les analyses sur l'État et ses administrations au quotidien contribuent à une meilleure appréhension des phénomènes complexes de corruption et de clientélisme, lesquels invitent à une anthropologie des marges de l'État, afin de mieux en saisir le fonctionnement. Une réflexion accrue sur les politiques transnationales est également engagée. Parallèlement, l'étude des catégories sociales se révèle être une entrée privilégiée pour rendre compte de l'enracinement du pouvoir politique dans un réseau social. D'autres approches qui s'intéressent au rôle des conduites sensori-motrices et des cultures matérielles dans les processus de gouvernementalité et de subjectivation, permettent également d'enrichir les analyses.

L'apport de l'anthropologie politique se manifeste aussi dans le traitement revisité de questions, comme celles de la constitution des espaces publics (local, étatique, religieux) et de leur articulation. Les travaux récents proposent ainsi de nombreuses réflexions sur les modes de délibération et de prise de décision, sur la capacité de créer de nouvelles normes locales légitimes, sur les liens entre citoyenneté et appartenances sociales, sur les relations «public/privé»...

La contribution de l'anthropologie politique concerne enfin l'analyse des conflits, et des formes de violence (depuis les conflits mineurs, les situations «ni paix ni guerre», jusqu'aux guerres et aux «violences extrêmes»), ainsi que l'étude des modalités de médiation, de négociation et de réparation dans des situations de post-conflits. Depuis les années 1990, un certain nombre d'États ont développé des réponses diverses aux actes de violences collectives et massives que les sociétés ont pu connaître, que ces violences proviennent de l'État lui-même, dans le cours d'un régime politique immédiatement antérieur ou plus ancien, d'un groupe ou de plusieurs groupes particuliers au sein de cet État, ou d'un État voisin. C'est ainsi qu'ont fleuri des dispositifs allant de l'amnistie – complète ou conditionnelle –

aux solutions pénales des tribunaux internationaux, en passant par des formules alternatives comme les «Commissions Vérité et Réconciliation», les mesures de lustration, les politiques muséographiques de présentation du passé, les mémoriaux, les (re)édition de livres d'histoire à l'usage des écoles. Certains de ces dispositifs se donnent une dimension internationale, non étatique, et constituent ainsi des nouveaux lieux politiques entrant en concurrence avec certaines des caractéristiques des États (souveraineté, impunité, etc.). Entre anthropologie politique et anthropologie juridique, l'étude de ces dispositifs et des lieux et normes qu'ils produisent fait partie des nouveaux objets qui mobilisent les sciences sociales, au cœur des enjeux, déjà exposés, de la mémoire, des usages politiques des traditions, ou des phénomènes de revendications identitaires, tels que l'autochtonie ou l'ethnicité.

5. De nouvelles questions relatives aux **activités économiques** invitent aujourd'hui les anthropologues à appréhender les nouvelles modalités de l'échange, de la création et de la répartition des richesses, dans des sociétés contrastées, confrontées à de nouvelles pratiques marchandes et financières. Dans les sociétés du Sud, la généralisation de l'économie monétaire n'a fait disparaître ni la segmentation des sphères d'échange entre biens monnayables ou non, ni l'intimité du lien entre les personnes et certaines catégories de biens, ni les prescriptions de temps, de lieu, de statuts, de réciprocité différée, de paroles, de gestes, etc., qui conditionnent telle ou telle transaction. Autant de pratiques et de représentations sur lesquelles achoppe la fiction de l'échange «nu». La circulation de l'argent semble toujours primer sur son immobilisation, les comportements d'ostentation, de dépense, de don, la concurrence et les défis d'honneur qu'ils peuvent comporter (ou, à l'inverse, les tactiques de dissimulation), la recherche permanente de protections magiques en cas de réussite économique, les modalités d'assomption de la dette intergénérationnelle, la ritualisation des gestes de cotisation, etc., autant de faits qui invitent à réexaminer les diverses figures de la relation entre marchandise et modèles culturels.

Par ailleurs, dans un monde fortement soumis aux influences et aléas de la finance et du marché, un nouveau chantier s'est ouvert sur le fonctionnement des activités financières et monétaires à l'échelle globale.

Par sa connaissance et sa pratique de terrains diversifiés au nord et au sud, l'anthropologie apparaît bien placée par ailleurs pour éclairer les modalités et les conséquences du **développement**. Elle permet ainsi, à partir de sa connaissance des savoirs locaux et des formes d'organisation sociale d'apporter un regard pertinent sur les effets concrets locaux des programmes de développement mis en place dans les pays du Sud, les acteurs qui y contribuent mais aussi ceux qui en sont exclus. Dans cette perspective, à partir de nouveaux terrains, les anthropologues se penchent depuis peu sur le travail des institutions internationales, et notamment les institutions financières internationales (FMI, Banque Mondiale, Organisation Mondiale du Commerce) en tant que diffuseurs de cadres normatifs, de savoirs et de ressources dans ces sociétés. Plus récemment, la pertinence de l'anthropologie s'affirme dans les champs connexes de « l'action humanitaire » et de la gestion des « catastrophes » qui prennent rapidement de l'ampleur.

Par ailleurs les recherches sur les phénomènes **d'exclusion sociale** méritent d'être développées en proportion du développement du phénomène d'exclusion lui-même qui est aujourd'hui exponentiel dans certaines sociétés européennes, comme la France, et qui touche de plus en plus de catégories sociales (jeunes, femmes, travailleurs...). Les logiques institutionnelles face à cette précarité et les logiques caritatives des associations sont à mettre en perspective avec les discours et les pratiques des personnes concernées qui sont « sans domicile fixe » mais non sans voix.

6. Les recherches sur les rapports des sociétés humaines à leur **environnement naturel** ont pris depuis la fin des années 1980 un tour nouveau, les travaux effectués tant dans la perspective de l'écologie symbolique que de l'anthropologie phénoménologique ayant conduit à questionner l'universalité de la notion de nature, telle qu'elle a été définie

dans les sociétés occidentales : un ensemble de réalités distinctes du monde humain et social. En la matière, le changement paradigmatique est patent, et a donné lieu récemment à un déploiement théorique important. L'anthropologie apparaît dorénavant comme une des disciplines qui, avec l'écologie, est capable de soutenir l'idée de multinaturalisme et commence à pister méthodiquement les tenants et les aboutissants d'une telle proposition.

Dans le champ des relations entre l'homme et le vivant, notamment l'animal, de nombreuses recherches sont en chantier. Questionnées de nouveau tant par les approches éthologiques et cognitivistes que par une actualité qui oblige à repenser le statut des animaux avec lesquels nous vivons (les pandémies, entre autres), ces recherches sont le lieu de débats vivaces sur des problèmes éthiques et politiques, et contribuent à rouvrir la problématique des frontières ontologiques.

Ce domaine de recherche touche par ailleurs à des questions politiques majeures, notamment pour ce qui concerne les rapports Nord-Sud. Les politiques de protection de la nature puis, après la convention de Rio (1992), de préservation de la biodiversité, soulèvent en effet la question de savoir qui doit piloter et, plus particulièrement, quelle place doit revenir aux populations locales, aux savoirs et aux représentations de la « nature » qui sont les leurs, dans la gestion de la biodiversité et les programmes de développement durable qui lui sont liés. Sont également étudiés les effets sur les populations locales des politiques de conservation du patrimoine naturel qui entravent bien souvent leur accès à des ressources désormais protégées. Caractéristique, enfin, de notre temps, l'ethnicisation du rapport à la nature qui permet à ces populations de revendiquer leurs droits d'usage et les conduit, en même temps, à se poser comme les gardiennes par excellence d'une nature avec laquelle elles vivraient en symbiose...

Les relations entre les hommes et leur environnement s'articulent aujourd'hui de plus en plus autour de tensions entre des sociétés locales et des enjeux nationaux, internationaux et transnationaux, que ce soit

les différentes « crises » environnementales (conflits autour de l'utilisation des ressources, catastrophes environnementales et naturelles, impacts du changement climatique) ou les questions de biodiversité ou de brevetage du vivant. L'anthropologie, de par son inscription de long terme sur les terrains locaux, est à même d'éclairer avec finesse ces tensions et de mettre en lumière la complexité des enjeux qui émergent dans ces situations. Elle permet également de saisir le sens que les populations donnent à ces crises et les ressources (symboliques, sociales, économiques, politiques) dont elles disposent pour les affronter.

Sur tous ces terrains, les travaux des anthropologues croisent à différents niveaux ceux des juristes, philosophes, historiens et sociologues des sciences. Se pose aussi la question, difficile et d'une décisive importance, du dialogue avec les spécialistes des sciences « dures » : naturalistes et écologues au premier chef. Elle pose à la fois des problèmes épistémologiques et éthiques, notamment pour ce qui concerne l'alternative entre axiologies « écocentrées » et anthropocentrées. La dimension biologique des objets d'étude est également à la base de rapports étroits avec d'autres domaines de l'anthropologie, notamment avec la paléoanthropologie (autour du problème, dans le cadre d'une approche phylogénétique, de l'apparition de la culture en lien avec l'évolution physique de la lignée humaine ; dans cette perspective le dialogue avec les primatologues, mais aussi avec les archéologues préhistoriens, demeure essentiel). Les possibilités de collaboration avec l'anthropologie génétique, à l'heure du séquençage de l'ADN, méritent également d'être signalées : comment le social, en particulier le choix du partenaire sexuel, influe-t-il sur le devenir biologique des populations.

7. Les recherches sur la **parenté, le genre et la sexualité** ont fait émerger de nouveaux objets liés à l'évolution des modèles familiaux et de parentalité. La problématisation en termes de genre est aujourd'hui importante dans tous les domaines de la société. L'anthropologie témoigne par ailleurs de la pertinence d'introduire la question de la sexualité dans

certains domaines d'étude, parfois en lien avec le thème plus classique de la parenté, ou celui plus récent des affects. La parenté, socle sur lequel s'est constituée l'anthropologie, ne cesse de s'enrichir de perspectives nouvelles, en particulier en intégrant la question du corps, des substances et du genre dans son analyse, ce qui lui a permis de renouveler considérablement son approche. La parenté reste un outil indispensable pour examiner les nouvelles façons de « faire famille » qui émergent dans notre société, qu'il s'agisse de familles recomposées, de familles homoparentales ou transparentales, de familles issues de procréations médicalement assistées ou d'adoptions... Ces recherches anthropologiques ouvrent la voie à l'interdisciplinarité puisque de tels sujets se situent bien souvent à la lisière de la médecine, de la psychologie, de la psychanalyse, du droit et de la bioéthique.

Par ailleurs les questions de parenté et de genre se transforment également dans les pays non européens, et les anthropologues sont le plus à même de rendre compte de ces changements. Ainsi, on voit par exemple apparaître de nouveaux droits relativement à l'âge au mariage, au divorce ou à l'héritage qui viennent bouleverser certaines pratiques et représentations du genre, de la filiation et de la famille. Des conflits de valeurs se font jour dans certaines sociétés entre une vision holiste et collective de la personne selon laquelle c'est à celui qui représente l'autorité familiale de décider des unions matrimoniales, et une vision individualiste et intimiste selon laquelle c'est à l'individu de décider de sa vie amoureuse et conjugale. Ce que les anthropologues ont l'habitude de décrire en termes de « mariage préférentiel », pièce essentielle de systèmes de parenté qui dépassent l'individu, peut être tout autant décrit aujourd'hui du point de vue du sujet lui-même sous la catégorie des « mariages forcés ». L'anthropologie contemporaine a aujourd'hui comme défi de rendre compte de ces mutations de sens et de ces différents niveaux de réalité.

Les manières de se rencontrer également se modifient de par le monde. Les nouveaux modes de communication comme le téléphone

portable et internet ont rendu les échanges entre les sexes beaucoup plus faciles qu'ils ne l'étaient auparavant. Ces nouveaux modes de rencontre, constituent un champ d'investigation, tant dans le domaine de l'entrée dans la sexualité que dans le domaine conjugal, qu'il convient de développer.

8. Les questions du **corps** et de la **santé** occupent une place importante actuellement en anthropologie. Des travaux récents ont déconstruit le dualisme cartésien du corps et de l'âme au profit de la notion de personne dans son ensemble. Ils ont contextualisé les rapports entre notion de « personne » et composantes du corps, et les relations que le corps entretient avec son environnement social ou « naturel » (hommes, esprits, animaux ou objets). La question du corps interroge les frontières entre le biologique et le social, entre la nature et la culture, et fait l'objet d'analyses anthropologiques renouvelées, qui s'intéressent également aux rapports entre corps et identités individuelles et collectives.

Les questions relatives à la santé et à la maladie ont été abondamment traitées par l'anthropologie depuis un demi-siècle. Les études sur les représentations de la maladie, le « sens du mal », et les pratiques thérapeutiques dans divers contextes culturels, qui ont fondé l'ethnomédecine, ont été progressivement complétées par l'approche des contextes de pluralisme thérapeutique, notamment au travers des logiques de soins. Par ailleurs, les systèmes de soins ont été abordés en tant que systèmes sociaux et systèmes de sens, ce qui a permis de dépasser les débats sur la place de l'anthropologie médicale au sein de l'anthropologie sociale et culturelle. La recherche en anthropologie a pu rendre compte de la pénétration de la biomédecine dans les sociétés non-occidentales, en analysant en particulier les rapports entre la production de savoirs et de techniques globalisés et leurs interprétations locales, notamment par les professionnels de santé et par les patients, dans le cadre microsocial des contextes de soin. L'intérêt de ces recherches appliquées à la santé publique est désormais reconnu par les institutions internationales telles que l'OMS ; désormais déve-

loppées en France, dans les pays européens et du Sud, elles doivent permettre d'une part d'ajuster les politiques de prévention et les systèmes de soins aux contextes sociaux, d'autre part de développer des connaissances sur les conditions d'articulation des politiques sanitaires à différents niveaux d'appréhension, de l'international au local. Elles ont également un intérêt théorique, notamment parce qu'elles documentent les effets de la biomédecine comme modèle culturel, exploré en particulier sous l'angle de la place qu'occupe la logique du risque sanitaire et de la médicalisation de l'existence dans les diverses cultures.

La pluralité thérapeutique se redéploie aujourd'hui dans un contexte d'internationalisation des soins aux dimensions multiples : migrations des thérapeutes et des patients, constitution de communautés virtuelles de malades utilisant les nouvelles technologies de la communication, auto-médicalisation par le biais d'internet sans la médiation d'un expert, développement de la télé-médecine, transnationalisation des médecines traditionnelles et de leurs rituels thérapeutiques, production de médicaments sous des formes contrefaites, conflits autour de la propriété intellectuelle concernant des traitements à base de plantes, tourisme médical et procréatif, etc. Parallèlement à la circulation des savoirs, des produits et techniques thérapeutiques, les recherches montrent une redéfinition des frontières entre biomédecine et thérapies alternatives ou traditionnelles, avec le développement de nouvelles formes de légitimation de savoirs « hybrides », souvent déterritorialisés, qui ne manquent pas de créer des zones de tension et de conflit sous le consensus apparent qui entoure les médecines « complémentaires et alternatives ».

Les travaux d'anthropologie politique de la santé ont été particulièrement développés en France, adoptant souvent une approche aux confins de la sociologie, analysant la dimension idéologique des soins, le traitement social des malades, l'incorporation des inégalités sociales, et les logiques de pouvoir sous-jacentes aux discours et aux pratiques liées à la maladie. Cette analyse a été étendue à la souf-

france sociale et à l'inscription dans les corps des violences structurelles. L'anthropologie a mis en lumière les rapports entre le corps biologique et son usage politique – littéral, dans les protestations sociales (grèves de la faim, mutilations publiques ou attentats suicides...) –, ou métaphorique... Les usages du corps, autrefois analysés essentiellement au plan des techniques corporelles et de leurs effets aux différents âges de la vie, méritent un nouveau regard anthropologique, discutant notamment de l'intégrité corporelle à l'heure du développement d'appareillages multiples, des greffes d'organes et des « prothèses numériques », alors que les mondes virtuels qu'offrent les nouvelles technologies permettent de dissocier la personne de son ancrage corporel.

L'anthropologie a un rôle majeur à jouer dans le domaine de l'éthique et de la bioéthique, à plusieurs niveaux : en approfondissant les voies du dialogue scientifique avec la médecine, le droit et la psychologie pour analyser les fondements techniques, épistémologiques et culturels de l'éthique ; en développant la réflexion sur les rapports entre universalisme et relativisme culturel sur des questions d'éthique particulières ; en approfondissant la question de « l'expérience » individuelle comme interface entre le corps dans ses dimensions physique, affective et psychique et l'environnement (naturel, social et spirituel...); enfin en observant les nouveaux enjeux sociaux et culturels liés aux évolutions des systèmes de santé et aux développements de la technologie médicale, y compris dans des pays du Sud. L'émergence du bien être corporel comme idéologie et comme ethos est un thème d'actualité, ainsi que le montre la visibilité croissante des moyens pour y parvenir (massages et produits de beauté souvent empruntés à des cultures lointaines...), alors que la gestion sociale et symbolique du vieillissement devient importante dans des sociétés aux populations de plus en plus âgées : la problématique de la fin de vie (dont la gestion pose en particulier des questions éthiques) devient ainsi de plus en plus pertinente (alors qu'elle a été classiquement négligée par l'anthropologie qui s'est plutôt intéressée au début de la vie...). Les questions de bioéthique, thème ancien de

l'anthropologie en ce qu'elle s'intéresse au sens et aux valeurs, offrent ainsi de plus en plus des objets de recherche heuristiques, et ont fait l'objet d'intéressantes analyses en termes de biopouvoir.

Au-delà des questions médicales, le corps est aujourd'hui comme hier, selon de nouvelles modalités sociales, une surface d'inscription de l'identité d'un groupe. De façon universelle, l'alimentation, qui correspond à un processus physiologique (la nutrition) au travers duquel le corps « ingère » une part de son environnement, reste un marqueur social de genre, de génération, et de statut. De la même manière, les études sur la procréation restent d'actualité, liées à celle du dimorphisme sexuel.

9. **L'anthropologie de l'art** reste globalement affectée par la théorie de l'*agentivité* (*agency*) dont les retombées méthodologiques continuent d'être notables – en même temps que discutées. En lieu et place d'une théorie esthétique qui interroge le sens des objets d'art et voit en eux des propositions symboliques, elle propose en effet de considérer l'art comme un « système d'action, conçu pour changer le monde » et les objets d'art eux-mêmes comme des *agents* sociaux capables de produire des événements d'un certain type. Entendus comme des acteurs prenant part à des relations sociales, les objets d'art sont doués d'une biographie, d'un parcours de vie, le long desquels ils acquièrent une efficacité. La description des modes de production de l'objet d'art, de ses modes d'exposition, de transmission, de conservation, est ce qui permet de révéler *in fine* sa spécificité, plutôt que sa valeur esthétique. Suivant cette perspective, les recherches actuelles ont tendance à décloisonner le champ des études sur l'art en s'intéressant à nouveau de très près à l'objet, qu'il soit artistique ou non, et en envisageant les formes d'usages et de manipulation, les opérations de transformations, les modes de circulation au cours desquels l'objet s'accomplit. Croisant les perspectives (anthropologiques, mais aussi archéologiques, philosophiques, historiques...), elles semblent s'intéresser davantage aux *modes d'action spécifiques* de certains objets ou dispositifs. Des notions transversales

comme celle de *performance* (qui permet d'opérer des rapprochements entre les sphères artistique et cérémonielle, par exemple) sont au cœur de plusieurs travaux.

Les dynamiques artistiques contemporaines, qui opèrent suivant des filières largement globalisées, constituent un autre champ de recherche en pleine expansion. Émerge une **anthropologie de la création** qui se concentre sur les opérations à l'œuvre dans la fabrication et l'avènement d'objets nouveaux. Au-delà de la rhétorique qui fait de l'acte de création un acte irréductible (tout acte de création est singulier et un acte ne peut être comparé à un autre...) et passablement non analysable (la création singulière tient au génie d'un auteur et en tant que telle, on ne peut y avoir accès), mais aussi au-delà de l'appréhension de l'art comme manifestation collective (l'art sans auteur, tel qu'il a été conçu pendant fort longtemps en anthropologie), ce sont les supports de la conception, les dispositifs techniques, sociaux, cognitifs qui font l'œuvre (la transforment, la diffusent) qui intéressent les enquêtes récentes, plutôt que son contenu.

Comme on le voit, la question de l'art en ethnologie a dépassé largement la question muséographique et ne porte pas uniquement sur les productions matérielles et leurs contextes de production. C'est une véritable **anthropologie du sensible** qui se développe également. Adjoignant à l'analyse empirique les perspectives ouvertes par les sciences cognitives, les recherches qui portent sur l'émotion, la passion, le goût, les qualités sensibles des espaces comme l'atmosphère, se multiplient. **L'ethnomusicologie** ou **l'anthropologie visuelle** contribuent pour beaucoup au développement de ce corpus, et mettent au point, pour l'aborder, des méthodes de captation et de description inédites.

Les avancées technologiques s'accroissent, les supports numériques de textes et d'images ouvrent des perspectives nouvelles, tant au niveau des enquêtes qu'au niveau des publications. Il est en effet possible aujourd'hui de combiner sur le même support – on parle de transmédiabilité – des textes de différents statuts (sources, archives, dissertations...), des images

de différents statuts (photos, vidéo, graphiques), des sons de différents statuts (discours, entretiens, conférences...). Les étudiants et jeunes chercheurs s'étonnent à juste titre de la très lente pénétration de l'image dans « nos disciplines de mots », à l'heure où tout le monde s'accorde à dire que nous vivons dans un siècle et une civilisation de l'image. Développer une réflexion épistémologique sur la spécificité de l'image ainsi que sur la complémentarité image et écriture s'avère aujourd'hui prioritaire. Il s'agit tout simplement, pour les métiers de la recherche en SHS, de ne pas se tromper de siècle. Depuis l'époque du positivisme triomphant, les théories de l'image ont progressé : on sait aujourd'hui qu'une image est toujours une production historique dont on peut étudier techniquement, économiquement, politiquement et culturellement les déterminations. On sait aussi que le regard, tout socialement construit qu'il soit, révèle une réalité spécifique, qui n'exclut aucun autre médium, mais exige la constitution d'une véritable **anthropologie de l'image**.

## 10. Actualité des aires culturelles

### Afrique

Malgré un rétrécissement inquiétant des dispositifs de recherche et d'enseignement en anthropologie des sociétés africaines (en France et plus encore en Afrique), malgré la fragilisation des conditions favorables aux enquêtes de terrain de longue durée, celle-ci continue à apporter des contributions significatives à plusieurs des thèmes ci-dessus énoncés, notamment dans le champ du politique, du religieux, des représentations de la maladie et du malheur, des productions matérielles et artistiques. Des domaines « classiques », tels la parenté ou le rituel sont aujourd'hui l'objet d'approches renouvelées en milieu urbain et rural aussi bien que dans l'espace migratoire. L'étude, systématisée grâce à de nouveaux logiciels, des réseaux d'alliance, la mise en perspective des notions de filiation et de résidence, l'analyse des liens entre parenté, circulations cérémonielles et économie, ont ouvert de nouvelles perspectives théoriques. Les recherches actuelles sur le rituel se développent dans deux directions : l'une qui s'intéresse

plus spécifiquement aux logiques interactionnelles qu'il met en œuvre, l'autre qui étudie l'activité rituelle (quel qu'en soit le lieu d'exercice) dans son rôle structurant des rapports sociaux en rapport avec des interdits fondateurs. Les transformations et adaptations actuelles de rites traditionnels en ville et au village sont un terrain d'observation particulièrement riche. Tout autant que le ressort et la labilité des conversions, les stratégies d'évangélisation ou de (ré)islamisation, le développement de nouveaux cultes ou mouvements anti-sorcellaires sont des thèmes plus particulièrement explorés. De manière générale, la coexistence et/ou la superposition de différents systèmes de représentations, les modes d'actualisation (y compris les plus paradoxales) d'une forme de pensée étrangère aux distinctions académiques entre politique, religieux, social et identitaire, se donnent à voir dans les comportements les plus divers et les plus quotidiens (business, travail, manières d'habiter et de cohabiter, de consommer, d'éduquer, etc.) mais aussi dans le registre du politique avec les multiples formes d'anastomose des réseaux « traditionnels » du pouvoir et du fonctionnement étatique et municipal ou encore dans celui des pratiques économiques. D'autres domaines font également l'objet de nouvelles approches, comme celui des rapports entre oralités et écritures, ou encore des modes de transmission et circulation des savoirs. Par ailleurs, dans la prolifération de programmes relatifs aux questions de patrimoine, de « gouvernance », de développement durable, l'anthropologie peine à faire entendre la spécificité de ses approches et de ses objets dans la mesure où ils interrogent tout autant les catégories occidentales que les logiques particulières à telle ou telle société africaine. Les mutations actuelles avec ce qu'elles peuvent engendrer de violences, mais aussi la foisonnante diversité culturelle, religieuse et politique des sociétés africaines forcent à de nouvelles réflexions sur la nature même de ces mutations et de leurs effets.

### Amériques

Les travaux qui s'ancrent sur le terrain latino-américain permettent de développer plu-

sieurs des thématiques déjà mentionnées (nouveaux mouvements religieux, questions de développement, migrations...). En particulier on soulignera les perspectives ouvertes par des recherches sur les nouvelles formes de parenté en Amérique latine, notamment comme conséquences des dynamiques migratoires que l'on observe dans la région. Ainsi la question des familles transnationales se pose aujourd'hui dans le contexte latino-américain. C'est également autour de la thématique environnementale – prise dans sons sens large – que l'anthropologie américaniste peut apporter de réelles connaissances, tant dans l'observation des « crises » environnementales (conflits autour de l'utilisation des ressources par exemple, impacts du changement climatique et des catastrophes naturelles sur les sociétés locales) que des questions de biodiversité ou de brevetage du vivant. La question du tourisme et de ses conséquences sur les sociétés locales est aussi une thématique que l'anthropologie américaniste est à même d'observer au plus près. Enfin, dans un contexte de transformations politiques des sociétés nationales, et de ce qui est parfois nommé le « virage à gauche » latino-américain de la dernière décennie, la question des relations entre les sociétés locales et les États nationaux se pose avec une grande acuité, invitant l'anthropologie à poursuivre ses chantiers autour de la thématique identitaire, du multiculturalisme et des relations de pouvoir.

Par ailleurs, **les sociétés afro-américaines**, pourtant tardivement intégrées dans le programme de l'anthropologie (trop mêlées, trop fluides, elles ne paraissaient pas répondre à l'idéal classique de « pureté » culturelle et d'authenticité qui a d'abord caractérisé la discipline...), sont aujourd'hui l'objet d'un investissement privilégié, dans la mesure où elles offrent un exemple accompli de création culturelle. Les analyses ont porté en particulier sur le domaine religieux, ainsi que musical. Dans les deux cas, la création locale se double d'une circulation transnationale des objets : cultes de possession, nouveaux christianismes ; jazz et musiques caraïbes...). Ces sociétés sont souvent décrites, comme leurs homologues des îles de l'océan Indien (qui ont connu le même façonnement par la traite

négrière et la plantation esclavagiste) comme « créoles ». Cette qualification met l'accent sur un certain fonctionnement, dans la longue durée, du pluralisme culturel, qui aboutit, malgré un formidable handicap de départ d'oppression et d'inégalité, et à partir de la confrontation de différents courants culturels, à des créations humaines originales et souvent harmonieuses. Elle permet également de reconnaître la singularité de dispositifs de résilience collective au long cours, qui rendent possible le dépassement des déchirures fondatrices (le « miracle » créole...). Le concept de créolisation a pour lui de ne pas se référer à un processus achevé, et d'être riche de possibilités latentes que nous ne faisons pour l'instant que pressentir. A ce titre certains analystes proposent de l'étendre aux sociétés plurielles contemporaines, que les sociétés créoles en quelque sorte préfiguraient.

Enfin, de nouveaux programmes mériteraient d'être développés en **Amérique du Nord**, espace où se joue une partie importante des enjeux mondiaux, que ce soit dans le domaine de la vie politique et démocratique, des effets de l'économie de marché et des systèmes financiers, du multiculturalisme, du métissage culturel, de l'invention et de la fragmentation religieuses, de la création artistique etc. L'anthropologie devrait donc être plus active à décrire, avec sa capacité propre d'observation, ce terrain particulièrement effervescent et propice à la compréhension des transformations de notre monde.

### Asie

On note pour l'Asie les mêmes tendances ou déplacements problématiques que pour les autres aires culturelles : moins d'intérêt porté à des thématiques classiques, telles l'organisation sociale ou la mythologie, et plus de travaux en anthropologie politique (mouvements minoritaires, violence, frontières, etc.) et en anthropologie religieuse (résurgences sectaires, prosélytismes, etc.). Des spécificités ou thématiques récurrentes à travers le continent peuvent être cependant indiquées. D'abord, l'importance des sources manuscrites oriente depuis longtemps une réflexion critique sur les relations entre traditions écrites et orales

(chroniques locales, coutumiers, etc.); plus récemment elle est à l'origine de travaux sur la textualité (textes liturgiques, systèmes d'écriture rituelle, etc.). Ensuite, des recherches ont été induites par l'évolution politique, de l'Inde à l'Indonésie, des États centralisés (émergence d'identités locales, conflits régionaux à caractère économique ou religieux, intégration des dernières « marges », sédentarisation des populations nomades, etc.), certaines portant plus spécifiquement sur les conséquences du « post-socialisme » (profils particuliers de la modernité ou retour du religieux en Chine, au Vietnam, au Laos, au Cambodge...). On peut également indiquer les études sur la mise en œuvre (et en scène pour le tourisme), sur fond de développement économique accéléré, de diverses patrimonialisations (monumentales, religieuses, « ethniques »...), ou bien l'anthropologie de « nouveaux objets » comme la robotique au Japon. Enfin, il convient de prendre conscience que de nouvelles communautés nationales de chercheurs se sont affirmées ces dernières années un peu partout en Asie, commandant des problématiques et des formes de partenariats renouvelées.

### Océanie

Caractérisée par son étendue géographique et son extrême diversité humaine (politique, linguistique et culturelle), l'Océanie a fourni – et continue de fournir – des contributions fondatrices à la réflexion anthropologique dans de très nombreux champs de recherche : migrations et peuplement insulaires ; sexualité, personne, corps et genre ; actualité et théories du rituel ; rapports entre structure, histoire et régime d'historicité ; politiques de l'identité et nationalismes. Aujourd'hui, l'utilisation d'outils technologiques neufs pour explorer les voyages/échanges interinsulaires, comme par exemple, la modélisation-simulation, permet de mieux connaître les trajectoires anciennes des pirogues qui ont parcouru le grand Océan mais aussi d'en dresser des cartographies dynamiques illustrant le savoir géographique des insulaires. On peut également souligner l'existence de courants migratoires qui, bien que de tradition ancienne, prennent des formes nouvelles (arri-

vée massive de populations chinoises en grande précarité dans les îles et archipels océaniques). Foyer de la controverse sur la *Kastom* et sur l'invention des traditions dans les années quatre-vingt dix, l'Océanie voit aujourd'hui se développer les débats autour des questions du bi- ou du multi-culturalisme (ex. : Nouvelle-Zélande, Australie), débats identitaires qui se nourrissent de la présence, en Australie, en Nouvelle-Zélande, en Nouvelle-Calédonie, de populations insulaires numériquement plus importantes que dans leurs îles d'origine. Ces transformations profondes et rapides de sociétés océaniques poussent les chercheurs en sciences sociales à repenser les rapports entre identités locales, politiques de la tradition et globalisation en les situant dans le contexte des édifications nationales. La thématique environnementale et patrimoniale est aussi présente : utilisation des ressources locales, impact touristique, marchandisation des cultures... Il convient de souligner le poids social, culturel et politique de la question religieuse océanique qui se déploie aujourd'hui sous des visages et des situations extraordinairement contrastées. Enfin, la recherche océaniste contribue à l'étude de l'europanisation du monde en développant une réflexion transdisciplinaire sur les modalités et les effets de la construction de cette région du monde en aire culturelle.

## Europe

L'Europe constitue pour notre discipline une aire culturelle très particulière dans la mesure où elle a constitué plutôt le contrepoint de tout ce qui, dans le monde, pouvait être désigné comme relevant d'aires culturelles spécifiques. Ce « grand partage » était accompli selon la polarité tradition/modernité et ses déclinaisons habituelles, qui revenaient souvent à situer l'Europe dans un « Occident » moins géographique que typologique. Pour autant le regard des ethnologues sur les sociétés européennes, et parfois sur leurs propres sociétés, a largement prouvé son intérêt heuristique en systématisant la mise en perspective globale des cultures et l'analyse de leur inter-pénétration historique. La genèse de l'Europe justifie en effet une approche du pluralisme

culturel que l'ère de la décolonisation et la critique de l'ethnocentrisme occidental ont permis de mettre à jour. La question de l'altérité au cœur même d'un continent trop longtemps pensé comme homogène s'est imposée, orientant l'attention des chercheurs vers les lieux de sa manifestation, notamment dans les villes et les banlieues, avec le développement de l'anthropologie urbaine, les marginalités sociales et les singularités culturelles ou religieuses. L'actualité des questions de frontières et de marges, des tensions et conflits qui s'expriment dans cet espace, entre Orient et Occident, ont suscité de nouvelles approches et l'exploration de nouveaux terrains. Les questionnements concernant les sociétés de l'Europe méridionale sont enrichis par leur inclusion dans un horizon comparatif méditerranéen, en prenant en compte les relations complexes et souvent contradictoires avec les pays situés sur la rive méridionale et orientale de cette mer. L'espace méditerranéen présente un éventail de situations – allant de l'opposition radicale à la créolisation des usages, en passant par les emprunts, les contacts et les confrontations entre les héritages multiples – qui en font un laboratoire stimulant pour la recherche anthropologique.

Les développements récents de la mondialisation imposent en effet plus que jamais de réviser les représentations figées des sociétés européennes. D'une part, l'Europe n'a plus (avec l'Amérique du Nord en particulier) le monopole du développement économique, des formes modernes du politique, de la connaissance, etc. D'autre part, les sociétés européennes sont engagées dans des processus mondiaux auxquels elles réagissent selon des modalités qui doivent être précisées. Cette situation conduit ainsi à mettre en relief des spécificités (sur les plans religieux, politique, économique, démographique) jusqu'ici souvent minorées et à développer des terrains européens sur les interactions Europe/monde. Un autre domaine riche en potentialités (et déjà bien investi) est l'analyse des effets des grands changements survenus dans l'espace européen au cours des trois dernières décennies : effondrement du bloc soviétique, guerres ou tensions nationalistes, effets de

l'intégration à l'UE... Si ces domaines recourent déjà les thématiques présentées ici (migrations, mondes urbains, etc.), leur analyse a sans doute beaucoup à gagner à mettre au jour des spécificités qui se révèlent d'autant mieux que l'on dispose désormais d'autres expériences comparables à l'échelle mondiale.

### 11. Le métier d'anthropologue. Le lien formation-recherche

La professionnalisation des anthropologues n'est pas sans poser de problèmes. Cette situation trouve son origine dans l'histoire longue de l'anthropologie française qui, en tant que discipline universitaire, s'est exclusivement consacrée à la formation d'excellence aux métiers académiques (enseignement supérieur et recherche) alors qu'elle a été plus absente, sinon réticente, sur le terrain de la recherche finalisée et de la réponse à la demande sociale. La spécificité de la discipline (terrains souvent éloignés, apprentissages linguistiques, durée longue des thèses) explique en partie cette situation : il convient d'insister ici sur la nécessité de continuer à nourrir la vocation première de la discipline à **produire des connaissances fondamentales** sur les sociétés humaines dans leur diversité et leurs changements et **conduire la comparaison** qui demeure la procédure majeure d'élaboration des faits et d'analyse dans la discipline. Seuls un socle théorique renouvelé et vivant et l'épreuve permanente du terrain peuvent permettre de contribuer parallèlement à répondre aux questions sociales du moment, sans sacrifier à des effets de mode.

Les anthropologues sont toutefois aujourd'hui plus nombreux à participer à des programmes de recherche finalisée, ce qui contribue à faire valoir les capacités de description, d'analyse, d'interprétation et de proposition de la discipline dans la société. Grâce à cette participation accrue, son expertise, ainsi que l'utilité de l'ethnographie dans son souci du détail et de la mise en perspective, sont mieux reconnues. Mais ces compétences mériteraient d'être systématisées dans des formations professionnalisantes, qui sont encore trop peu nombreuses dans des domaines où l'anthropologie peut apporter un éclairage essentiel pour

comprendre les ressorts et les rouages des sociétés, qu'il s'agisse des questions économiques, du monde du travail et de l'entreprise, du développement des pays du Sud, des questions de santé et d'environnement, des âges de la vie ou des politiques publiques...

### Des statistiques préoccupantes et la nécessité de renouveler et renforcer le potentiel pour relever les défis scientifiques de notre temps.

Finie, l'anthropologie ? A regarder les statistiques, l'avenir de la discipline apparaît incertain sur le plan institutionnel. Des sections relevant de l'INSHS, la section 38 est celle qui compte le plus de départs à la retraite. Elle est l'une de celles qui comptent le plus d'agents de 60 ans et le moins d'agents de moins de 50 ans. La moyenne d'âge des chercheurs y est la plus élevée des sections de sciences sociales avec 52,2 ans pour une moyenne de 50 ans pour l'INSHS. En l'espace de 15 ans, 62 % des effectifs de chercheurs partiront à la retraite. Cette séniorité ne s'accompagne pas des « honneurs » puisque la 38 compte le pourcentage de DR le moins élevé des SHS : seulement 31 % des agents sont DR, pour une moyenne de 37 %. La section affiche la moyenne d'âge la plus haute pour les DR (59 ans. moyenne de 57 ans en SHS) comme pour les CR (49 ans pour une moyenne de 46 ans en SHS). Ajoutons les trop faibles possibilités de promotion à tous les niveaux, et l'extrême rareté de celles-ci à l'intérieur du corps des DR : il n'y a en particulier parmi les DR, aucun CE, et il n'y a eu aucun passage à la classe exceptionnelle pour les dernières années : les anthropologues n'auraient-ils plus droit à une carrière complète ?

Dans les années à venir, la 38 sera la plus petite section de l'INSHS en termes démographiques si aucune politique soutenue de recrutement ne vient pallier cette hémorragie. Or la diminution sensible du nombre de postes par rapport au nombre de candidats ne peut qu'inquiéter. En 2007, nous comptons 20 candidats pour 1 poste en SHS, en 2009, il y en avait 32. Dans ce contexte, la section 38 connaît une légère embellie. Alors qu'elle était mal dotée en 2007 (30 candidats pour 1 poste), elle se trouve aujourd'hui dans la moyenne (32 candi-

dats pour 1 poste). Il reste cependant que l'absence d'une politique de soutien fort à cette discipline compromettra certainement son avenir à moyen terme.

Cette fragilité de l'anthropologie au CNRS se retrouve dans son architecture institutionnelle. Avec seulement 15 laboratoires relevant uniquement d'elle, la 38 est la section du CNRS qui compte le moins d'unités de recherche au CNRS, très loin derrière les autres sections SHS. Autrement dit, les anthropologues au CNRS ne sont pas dans des laboratoires d'anthropologie : 45% des anthropologues sont dans des unités qui ne relèvent pas de la 38. Il y a là un paradoxe, dans la mesure où l'anthropologie, classiquement, a trouvé son lieu d'épanouissement privilégié au CNRS, beaucoup plus que dans les universités...

**La situation des ITA n'est guère plus favorable.** Les personnels ITA, au nombre de 81, représentent 31% des effectifs totaux de la section 38. Ils sont essentiellement spécialisés dans les BAP F (documentation, culture, communication, édition...), BAP J (gestion et pilotage), BAP D (sciences humaines et sociales),

BAP E (informatique, statistique et calcul scientifique). La section compte 12 IR et IE qui appartiennent aux BAP F et BAP D (sciences humaines et sociales), intervenant dans différents moments du processus de recherche et de diffusion scientifique, depuis la veille documentaire, la production et l'analyse de données, jusqu'à la communication et l'édition. 16% de ces personnels ITA avaient plus de 60 ans en 2009, et feront valoir leurs droits à la retraite à brève échéance.

Si leur remplacement n'est pas envisagé le fonctionnement de certaines Unités en sera ralenti. La participation des ITA, si déterminante dans les dispositifs de plus en plus complexes de programmation et de financement de la recherche à l'échelle nationale, européenne ou internationale, risque en effet d'être fortement compromise, réduisant de fait la capacité des équipes à assurer leur financement et à prendre place dans la recherche internationale. La réduction des effectifs ITA risque de les priver de compétences essentielles pour la mise en œuvre et l'accompagnement de la recherche finalisée.

# 39

---

## ESPACES, TERRITOIRES ET SOCIÉTÉS

*Président*

Olivier COUTARD

Pablo BILBAO  
Nadine CATTAN  
Sylvette DENEFLÉ  
Sandrine DEPEAU  
Vincent GOUËSET  
Françoise GOURMELON  
Christophe LMBERT  
Claude JACQUIER  
Corinne LARRUE  
Bénédicte MICHALON  
Olivier PISSOAT  
Monique POULOT  
Joëlle SMADJA  
Bernard TALLET  
Jean-Paul THIBAUD  
Jean-Pierre TRAISNEL  
Anne TRICOT  
Brice TROUILLET  
Stéphanie VERMEERSCH  
Christine VOIRON

*(août 2010)*

### 1 – ÉTAT DES LIEUX

La communauté scientifique de la section 39 (dénommée « section 39 » dans la suite du texte) s'attache à l'étude de l'organisation, du fonctionnement et de l'évolution des territoires, dans leurs interactions avec les systèmes sociaux et, de manière croissante, avec les écosystèmes. Plus largement, elle contribue au développement d'une intelligence spatialisée des phénomènes sociaux prenant en compte l'importance de la localisation, des variations dans l'espace, des liens entre échelles et entre niveaux d'organisation, ainsi que la temporalité des dynamiques spatiales et l'articulation des échelles temporelles.

La section se caractérise par des liens forts avec l'université, grâce à la forte présence des enseignants-chercheurs au sein de ses unités, et par sa très large interdisciplinarité. Bien que la section soit résolument ancrée dans le champ des sciences humaines et sociales, nombre de ses questionnements, de ses recherches et de ses équipes se situent à l'articulation avec d'autres champs disciplinaires, en particulier les sciences de l'environnement.

En juin 2010, la section 39 compte sur le territoire national 39 unités de recherche de tous statuts (UMR, FRE, UPR, ERL, UMS), auxquelles s'ajoutent une UMI, 11 USR en France (notamment certaines MSH), 13 USR à l'étranger (en soutien aux UMIFRE), ainsi que 9 Fédér-

rations de recherche ou GDR (Groupements de recherche). Les unités rassemblent 1 630 chercheurs et enseignants-chercheurs, dont 280 chercheurs CNRS (soit 17 %, ratio supérieur à celui relatif à l'ensemble des SHS), et 421 IT dont 260 TA CNRS. Le ratio ITA CNRS / Chercheur CNRS atteint 93 %, en baisse tendancielle significative (109 % en 2004), ce qui constitue une évolution préoccupante notamment en raison de la pyramide des âges des ITA.

Les 28 unités (UMR, UPR, ERL, FRE) relevant à titre principal de la section 39 représentent 1 400 personnes, dont l'âge moyen est de 49 ans. Les femmes comptent pour 39 % de l'ensemble, mais seulement 35 % des chercheurs et enseignants-chercheurs alors qu'elles représentent 56 % des ITA et IATOS.

Dans la pyramide des âges, pour les hommes et plus nettement encore pour les femmes, une classe creuse se distingue (55-60 ans), qui résulte d'une faiblesse des recrutements des années 1985-1990. Ce déficit pèse actuellement sur les prises de responsabilité dans les unités.

#### Méthode d'élaboration du rapport

Une enquête auprès des unités relevant de la section a permis d'amorcer la réflexion en donnant une image partielle mais riche d'enseignements sur les positionnements, stratégies, thématiques et méthodologies de recherche d'une partie des unités, et sur les questions vives dans le champ de la section. Cette enquête a été menée par questionnaire adressé par voie électronique aux directeurs d'unité. 27 réponses ont été reçues, en provenance des deux tiers des unités relevant de la section 39 sur le territoire national. Au cours d'une assemblée générale (le 30 septembre 2009), a été amorcée une réflexion collective, qui s'est poursuivie plus classiquement au sein de la commission.

Les principales disciplines représentées dans les unités de la section sont la géographie (présente dans presque toutes les unités), la sociologie (dans les deux tiers), l'aménagement et l'urbanisme, l'architecture, l'anthropologie, les sciences politiques (chacune concernant la moitié des unités environ), l'économie, l'ethnologie (dans une unité sur trois) et la psychologie. Les rapprochements s'opèrent non seulement à partir de méthodes ou d'objets empiriques communs, mais aussi

d'approches, de théories et de corpus conceptuels de plus en plus partagés. Ils sont également favorisés par la circulation des idées avec des communautés scientifiques étrangères, anglophone notamment.

Cette pluridisciplinarité importante s'accompagne d'une diversité de méthodes, qui incluent les outils de l'analyse spatiale, l'étude des acteurs et de leurs représentations, l'analyse des images et de l'iconographie, l'étude des textes et des archives. On peut souligner la prégnance croissante des approches qualitatives, comparatives et pluridisciplinaires.

Les grandes thématiques de recherche sont relativement stables (cf. *infra*). On peut noter une accentuation des travaux sur les dynamiques territoriales, les articulations des espaces-temps, les changements environnementaux, les risques et la vulnérabilité des espaces et des sociétés, le « bien-être » (cadre de vie, ambiances, esthétique, créativité...), certains travaux intégrant également désormais l'échelle du corps.

Les questions relatives aux espaces ruraux, aux différents usages des sols et aux conflits afférents, à l'alimentation et l'agriculture, pourraient être plus développées compte tenu des enjeux socio-politiques majeurs sous-jacents. Le thème du genre (en référence aux *gender studies* et à la *gender geography*) est encore peu présent, en comparaison de la place qu'il occupe dans les recherches anglosaxonnes. La remarque vaut d'ailleurs pour d'autres champs des *cultural studies*, même si les thématiques qui sont au cœur des études post-coloniales, comme l'identité ou l'ethnicité, font l'objet d'un intérêt croissant.

Les villes et les régions urbaines (ré)émergent comme des instances politiques majeures susceptibles d'inventer de nouvelles formes de régulation à l'échelle planétaire, ce qui dessine un territoire prometteur pour des recherches à venir. Le développement durable comme « paradigme » a cédé la place à des questionnements plus circonscrits sur les implications socio-spatiales des changements environnementaux planétaires et des ruptures et transitions afférentes, d'ordre démographique,

énergétique ou environnemental, en termes de modes de vie, ou encore d'ordre sociotechnique (essor des techniques urbaines « vertes » de gestion de l'eau, de l'énergie, des déchets, de la mobilité, etc.). Enfin, l'étude des liens entre les systèmes urbains (ou les sociétés urbaines) et leur environnement à différentes échelles spatiales et temporelles constitue un champ de recherche en plein essor, que le PIRVE (programme interdisciplinaire de recherche Ville et Environnement) s'attache à structurer.

## 2 – THÈMES STRUCTURANTS : BILANS ET PERSPECTIVES

### 2.1 ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

Le thème de l'environnement a vu son importance s'accroître considérablement dans les recherches en sciences humaines et sociales au cours de la dernière décennie. Les travaux de la section apportent une contribution spécifique à ce champ de recherche en appréhendant les milieux dans leurs composantes « physique » (au sens géographique du terme), humaine, sociale et sensible, même si ces dimensions demeurent inégalement articulées dans les travaux particuliers.

La notion d'impact, dominante dans les années 1980, a cédé le pas à celle d'interactions. Dans un schéma circulaire, les sociétés humaines s'exposent aux conséquences des dégradations écologiques et du forçage climatique qu'elles génèrent. Au nom du développement durable, la prise en charge de la question environnementale s'opère désormais à tous les niveaux territoriaux. La durabilité semble aujourd'hui moins un concept qu'un opérateur de conduites collectives : polysémique et toujours controversé, le développement durable a néanmoins fait l'objet d'un effet

d'assimilation dans les pratiques individuelles et collectives. Mobilisations sociales et « jeux » politiques contribuent à forger les priorités entre la lutte contre le changement climatique, le maintien de la biodiversité et autres choix collectifs afférents aux changements environnementaux à l'œuvre à l'échelle planétaire.

Les débats épistémologiques entourant la problématique environnementale ont cependant favorisé les transformations des concepts et l'apparition de nouveaux paradigmes. S'appuyant entre autres sur les approches (quasi) expérimentales issues des sciences écologiques, des approches plus intégrées se développent, articulant les dimensions physiques et sociales, les échelles spatiales et temporelles, les grands champs d'action collective. De façon plus émergente, l'étude de l'adaptation aux changements environnementaux s'appuie désormais également sur ce que l'on pourrait nommer des « paradigmes de la création », mettant en exergue les notions d'acteurs, d'*empowerment*, de compétence environnementale, d'engagement éthique et esthétique ou encore de prospective environnementale.

### Risques, vulnérabilité

Les risques et la vulnérabilité des territoires sont des thèmes fortement investis par la section 39. Les travaux menés s'inscrivent dans un mouvement général au sein des sciences cindyniques de remise en cause de la distinction radicale entre risques « naturels » et « technologiques ». Dans un contexte scientifique et sociopolitique qui met en avant les « changements environnementaux planétaires », et notamment les changements climatiques, l'étude de la capacité d'adaptation des territoires et des sociétés prend un relief particulier.

Un ensemble de recherches actuelles sur les formes urbaines ou, plus largement sur l'organisation des systèmes territoriaux, porte ainsi sur les questions de résilience, entendue comme la capacité d'un système à résister à des perturbations de natures diverses, par exemple en produisant de nouvelles formes de participation et de création. D'autres tra-

vaux appréhendent les formes de vulnérabilité des territoires (i.e., leur propension à être affectés négativement par diverses perturbations) comme facteurs de disparités et d'inégalités socio-spatiales. Une partie de ces travaux s'intéresse plus particulièrement aux liens entre contraintes, aménités ou nuisances environnementales et inégalités socio-spatiales, et à leur caractère cumulatif. Certains s'attachent plus spécifiquement à la question des inégalités environnementales, approchées à partir de la notion de justice sociale ou écologique.

Parmi les thématiques émergentes, on peut mentionner le développement de recherches sur les transformations de l'action publique, concernant notamment la place et la mobilisation des populations exposées dans les processus de décision et de gestion relatifs aux risques, et les travaux s'intéressant aux formes de report de risques sur les générations futures, qui interrogent la viabilité à long terme des modes contemporains d'organisation socio-territoriale. L'étude des liens entre changements environnementaux planétaires et dynamiques territoriales est un champ de recherches qui présente de fortes potentialités de développement y compris sous la forme de scénarios d'évolution du territoire, prenant en compte les mécanismes de localisation des ménages et des activités, les réseaux territoriaux des groupes sociaux et des individus et les pratiques de mobilité.

### **Qualité de vie, santé, bien-être**

Les questionnements en termes de qualité de vie revêtent une importance croissante au sein de la section 39. Les recherches menées permettent d'éclairer tant la notion de durabilité (des espaces et des pratiques) que celle de désirabilité (qui renvoie à la perception individuelle ou sociale des qualités de l'environnement). La recherche de transversalités entre des approches techniques, écologiques et sociales de l'environnement a progressé ; de même que l'introduction de problématiques esthétiques et d'approches sensibles dans l'analyse des milieux de vie favorise l'articulation entre

enjeux écologiques contemporains et processus de conception et de production de l'environnement construit.

La santé apparaît comme un enjeu transversal tout autant que thématique. La conception dominante qui sous-tend les travaux menés dans la section est que la notion de santé ne se rapporte pas seulement aux besoins de soins primaires ou à l'absence de maladies, mais relève aussi d'approches intégrées combinant les dimensions économiques, culturelles, sociales, et environnementales à l'échelle d'un territoire. L'accès aux soins et le maintien de la qualité de vie sont appréhendés sous l'angle des inégalités territoriales et sociales et renvoient donc à des enjeux de planification sanitaire et de qualités de l'environnement tout autant qu'aux facteurs étiologiques. Cette approche conduit à s'intéresser également aux conditions et modalités de l'articulation entre démarches d'intervention, de prévention (des risques en particulier) et d'amélioration ou de préservation de la qualité de vie et de l'environnement.

### **Ressources et services écosystémiques, métabolisme, écologie territoriale**

La gestion des ressources (notamment le fonctionnement des hydrosystèmes), les processus de transformation des sols et des paysages sont des domaines de recherche anciens et importants de la section 39. Ils structurent ou recourent les programmes de recherche de nombreuses unités relevant de la section. Deux lignes de recherche émergentes favorisent un certain renouvellement des travaux dans ces domaines.

Un premier ensemble de travaux à la croisée de l'économie, de l'écologie, de la géographie et des sciences politiques, s'attache à appréhender, mesurer, voire modéliser les services procurés aux populations humaines par les écosystèmes. Ces travaux sur les services écosystémiques apportent un éclairage complémentaire dans le domaine de la gestion intégrée des ressources environnementales, notamment au sein d'espaces sensibles tels

que le littoral, les massifs forestiers ou les franges urbaines.

Un deuxième ensemble de travaux, de nature également interdisciplinaire, concerne les flux de matières et d'énergie mis en jeu dans le fonctionnement, la reproduction et le développement des systèmes territoriaux et, en particulier, des systèmes urbains. Ces travaux s'attachent à rendre compte des caractéristiques des flux en fonction des contextes étudiés : morphologie (par exemple : tissu urbain dense, multipolaire ou étalé), équipement infrastructurel, activités économiques, modes de vie... Ce courant de travaux, susceptible d'enrichir notre compréhension des dynamiques territoriales passées, présentes et futures, apparaît comme très prometteur.

Plus largement, les questions de recherche situées à l'articulation entre les changements environnementaux planétaires et les dynamiques territoriales, et notamment urbaines, paraissent devoir prendre une importance notable dans les années à venir. Les préoccupations relatives aux changements climatiques (et enjeux afférents d'atténuation et d'adaptation), à l'érosion de la biodiversité, à la raréfaction ou dégradation de ressources naturelles vitales ou stratégiques (eau, énergies fossiles), aux conflits d'usages des sols, etc. sont appelés à transformer (et transforment déjà) en profondeur les valeurs, les objectifs, les priorités de l'action collective à toutes les échelles. Les enjeux politiques, économiques, sociaux d'une maîtrise collective du « système Terre » sont évidemment majeurs. Mais les enjeux de connaissance à l'articulation entre grandes disciplines (sciences humaines et sociales, de l'environnement, de la terre, de l'ingénierie...) sont également considérables.

## 2.2 POPULATIONS, SOCIÉTÉS, MOBILITÉS

Les migrations font l'objet d'une attention soutenue, avec des lectures de plus en plus fines, notamment en termes de démographie,

par exemple autour de l'étude des changements de pratiques matrimoniales et reproductives. L'évolution de la structure des ménages, l'essor de la monoparentalité et ses conséquences en termes d'appauvrissement et de vulnérabilité comme de segmentation géographique sont également pris en compte, permettant un dialogue avec d'autres approches relevant des sciences humaines et sociales. Un ensemble émergent de travaux sur le vieillissement des populations (portant notamment sur l'Europe) et ses conséquences sociales et spatiales fait écho à une importante tradition de recherche sur la transition démographique.

Ces travaux sont conduits aujourd'hui à différentes échelles spatiales (jusqu'à celle de l'individu) et temporelles (en prenant en compte le temps long des trajectoires biographiques même si les approches diachroniques restent encore insuffisamment développées). Pour autant, les besoins, contraintes, rapports à l'espace au cours des étapes de la vie sont intégrés, donnant à comprendre la singularité des pratiques et des représentations des différents groupes sociaux : les pratiques scolaires, le passage à l'âge adulte, les stratégies résidentielles, les « stratégies reproductives », l'évolution des besoins avec le vieillissement, etc. constituent autant de pratiques et de modes d'habiter qui changent au cours de la vie.

### Liens et divisions sociales de l'espace

Le champ du *pouvoir et du politique* fait l'objet d'une attention soutenue dans les recherches sur les territoires. Cela n'est pas nouveau. Mais le constat se renforce et les sciences politiques occupent une place de plus en plus importante dans les questionnements de la section. On peut en outre relever une diversification des objets et des approches. Des analyses des phénomènes politiques *stricto sensu*, relancent et renouvèlent la géographie politique et électorale en s'intéressant aux opinions et à leurs expressions électorales, aux organisations politiques, à la constitution et au fonctionnement des systèmes politiques. Des recherches portant sur des conflits interna-

tionaux, des questions frontalières, des découpages territoriaux et des régionalismes, des conflits locaux et d'aménagement éclairent la question des rapports de pouvoir sur des territoires. Notons par exemple l'importance des travaux consacrés à la gouvernabilité de la ville, aux conflits d'influence qui s'y exercent, à la « résistance » des habitants à certaines politiques publiques comme à certaines situations collectives (insécurité, inégalités environnementales, etc.). Les mobilisations collectives sont également étudiées, souvent replacées dans le contexte de la « crise de la modernité » et de la transformation des formes de légitimation de l'action collective.

Les inégalités sociales comptent parmi les facteurs structurants des espaces comme des pratiques et des représentations socio-spatiales, et l'étude des *disparités socio-spatiales* constitue un champ thématique traditionnellement important de la section (et qui recoupe d'ailleurs le précédent). Les inégalités, la pauvreté et la marginalité, les marges, les discriminations se déploient dans de multiples configurations sociales et spatiales. Elles sont appréhendées de plusieurs manières, par exemple à travers la production de ces inégalités et des discriminations afférentes ; les groupes sociaux concernés par ou issus de ces dynamiques sociales, et leurs modes de vie ; les politiques publiques qui leur sont consacrées, leurs évolutions, leurs effets... Les ressources et les capacités d'adaptation ou de choix des individus et des groupes sont également prises en compte et analysées, par exemple, à partir de la ville « en creux » et de ses espaces de relégation. On peut également souligner le regain d'intérêt pour une lecture territorialisée de la stratification sociale, qui permet à la section 39 de contribuer au renouvellement des travaux sur la division sociale de l'espace.

Un autre courant de travaux porte sur les *questions identitaires, les rapports à l'autre*. Les processus identitaires servent de cadre de compréhension de ce qui dans l'espace crée des différences, des déséquilibres, des inégalités à l'heure où les pratiques et modes de pensée tendent à s'individualiser de plus en plus. Notons l'expansion des travaux sur l'ethnicité, les processus d'ethnicisation, de catégorisation

ethnique et les relations interethniques, appréhendés dans différents contextes : espaces urbains, relations minorités/majorités, conflits politiques et territoriaux, migrations internationales... Cette thématique doit son essor à la collaboration entre géographes, sociologues et anthropologues. Les religions font également l'objet d'une attention renouvelée, à la faveur de l'inscription renforcée des lieux de religion dans l'espace urbain et de la globalisation du fait religieux. Les travaux sont consacrés aux modalités de transcriptions spatiales du fait religieux, comme aux comportements religieux eux-mêmes.

À l'intersection entre dynamiques de la population et divisions sociales de l'espace, se trouvent les travaux, relativement peu développés en France, sur le *genre* ; mentionnons à titre d'exemple les travaux sur les femmes migrantes, les implications socio-spatiales de la division sexuelle du travail ou la construction spatiale de la masculinité. On se penche aussi sur la manière dont la différence construite des sexes contribue au regard porté sur le monde et sur l'espace, voire sur la construction des savoirs scientifiques (géographiques par exemple).

Genre, religion, ethnicité, culture font de plus en plus l'objet de travaux visant à appréhender toutes les nuances des hiérarchies sociales et de leurs implications spatiales. Et la compréhension des rapports des groupes et individus à l'espace s'imbrique de plus en plus dans des dynamiques sociales et politiques où les jeux de positions et différenciations sociales sont tout autant étudiés à partir de groupes sociaux que d'individus – lesquels sont entendus comme acteurs mais aussi comme agents, comme consommateurs mais aussi et surtout comme producteurs d'espaces et de sens. Les travaux menés se sont ainsi attachés à prendre en compte la centralité de la figure du *sujet*, ce qui a conduit à porter les analyses au cœur des perceptions et représentations sociales et individuelles de l'espace et leurs conséquences sur les pratiques spatiales.

Soulignons enfin que parmi les thèmes émergents de la section figure le thème du *corps*, décliné à travers plusieurs questionne-

ments connectés les uns aux autres : la nudité, le positionnement des corps dans l'espace, l'instrumentalisation des corps et les significations des traitements corporels dans des rapports de pouvoir mais également le corps comme présentation de soi dans la scène publique, les sexualités, le corps et la sensorialité spatiale pourvoyeuse de sens dans la production des ambiances, enfin le corps comme cadre d'analyse des pratiques spatiales et support de définition de nouvelles formes de praxéologie spatiale.

## Mobilités et migrations

Les mobilités et les migrations constituent l'un des principaux champs de recherche de la section.

Les *mobilités quotidiennes* des habitants sont abordées dans leurs différentes facettes, mobilités de travail, d'approvisionnement, scolaires, de loisir, etc., lesquelles amplifient ou atténuent les divisions des espaces. Les recherches portant sur les mobilités quotidiennes se sont développées suite à une forte demande sociale de la part des collectivités territoriales qui ont multiplié les enquêtes ménages déplacements (EMD). Dans ce contexte, les méthodes de traitement se sont affinées pour à la fois mieux saisir le peuplement des quartiers d'une agglomération selon l'heure de la journée, ainsi que les pratiques spatiales des individus et leur gestion au sein des ménages : autant de recherches qui aident à décrire et à comprendre les enjeux interdépendants des politiques de transport, d'habitat, d'éducation et de tourisme. L'apport de la *time geography* a été majeur dans la compréhension des rythmes de déplacement, de la gestion du temps par les ménages et des contraintes de déplacement pesant sur le choix des lieux d'activité. Si les recherches contribuent à la définition de l'accessibilité entendue dans toutes ses dimensions (sociales, cognitives, spatiales, temporelles), d'autres travaux plus centrés sur les échelles pédestres participent à la définition des ambiances, à la différenciation entre modes d'habiter, et ce grâce à l'investigation

non seulement des pratiques mais également des conduites des préférences spatiales et des représentations socio-cognitives de l'espace.

Les *mobilités résidentielles et migrations internes* font également l'objet de recherches nombreuses, y compris à l'échelle intra-urbaine. Ces recherches replacent les choix résidentiels dans des logiques individuelles, de ménage, professionnelles ou sociales (ethniques, religieuses, etc.).

Les lectures spatiales des *migrations internationales* constituent un domaine de recherche emblématique de la section. Les travaux récents ont permis des avancées notables, qu'il s'agisse de la mise en évidence de l'existence d'espaces migratoires structurés par des logiques de réseaux sociaux, physiques et immatériels ; de la reconnaissance de la figure du migrant, acteur de sa trajectoire mais inséré dans des dynamiques collectives de taille et de nature variées ; de l'appréhension des enjeux sociaux, spatiaux et politiques des migrations, dont les logiques peuvent entrer en résonance, en dissonance ou en concurrence avec celles des États. La montée en puissance théorique et les réflexions menées autour de notions telles que les diasporas, les réseaux, la circulation migratoire, le transnationalisme, les espaces ou systèmes migratoires, ont permis de conforter la place des approches spatiales au sein des études migratoires.

Parmi les thématiques émergentes au sein de ce champ de recherche dynamique, notons d'abord la question des liens entre migrations et santé, qui fait écho à des travaux d'anthropologie et d'épidémiologie. Signalons également le développement d'études portant sur les entraves à la migration et aux déplacements (migrations forcées, asile, politiques migratoires et contrôles aux frontières, centres de rétention...) et reliant davantage les lectures spatiales des migrations à celles du pouvoir. Mentionnons enfin la thématique des migrations environnementales, qui fait l'objet d'une attention forte de la part des décideurs politiques et des organismes internationaux ; essentiellement abordée sous l'angle des réfugiés climatiques, elle est peu étudiée au sein de la

section alors qu'elle se situe au croisement de plusieurs de ses spécialités.

Une avancée notable des dernières années est la remise en question de la césure entre les catégories d'analyse « mobilités » et « migrations », qui sont aujourd'hui davantage appréhendées comme un continuum de pratiques et de représentations spatiales dans le « paradigme de la mobilité » (qui fait écho au *mobility turn* en sociologie). La division classique ancrage/mobilité est fortement remise en cause. Il s'agit désormais d'analyser les déplacements dans l'espace, non plus seulement à des fins d'analyse matérielle et spatiale (infrastructures, aménités, etc.) mais à des fins de prise en compte du sujet (social), de son expérience et de son histoire de vie, et ce à différentes échelles spatiales, temporelles et sociales et à l'articulation entre ces échelles.

## 2.3 VILLES ET TERRITOIRES

Les études urbaines ont connu au cours de ces quinze dernières années un renouvellement important. Celui-ci tient pour beaucoup à des collaborations interdisciplinaires si bien que les objets de recherche disciplinaires sont de plus en plus enchevêtrés : la recherche architecturale s'intéresse aux évolutions sociales des villes ; la géographie urbaine produit un nombre croissant de travaux sur les pratiques et les identités urbaines ; la sociologie urbaine tient compte de l'environnement des individus et des groupes ; etc. L'internationalisation des recherches urbaines s'est poursuivie, en termes de terrains comme de collaborations, et les sources de financement se sont diversifiées.

### **Dynamiques sociales et recompositions des territoires métropolitains**

La diversité et la complexité des dynamiques affectant les espaces urbanisés deviennent difficiles à appréhender avec les modèles classiques du développement urbain.

Les travaux menés dans ce champ par la section 39 relèvent souvent de comparaisons nationales ou internationales (nord-nord, nord-sud ou sud-sud) sur des terrains le plus souvent situés dans des grandes métropoles. Ils questionnent la pertinence des schémas les plus couramment appliqués pour saisir la dynamique de la division sociale de l'espace : étalement urbain, gentrification ou ségrégations socio-spatiales. Les recherches qui montrent comment des périphéries urbaines se structurent en bassins de vie permettent de reformuler le débat qui, à la fin des années 1990, se posait en termes de ville dense *vs* ville diffuse. Le positionnement théorique aujourd'hui dominant consiste à placer les métropoles dans des dynamiques combinant polycentrisme et métropolisation, éclatement et cohésion, mixité et ségrégation, rural et urbain. Concernant l'évolution des centres anciens, la perspective selon laquelle les quartiers en amorce de gentrification auraient irrésistiblement vocation à s'embourgeoiser, est contredite par des enquêtes qui mettent en lumière les résistances développées par des usagers des lieux. L'analyse structurale des ségrégations urbaines est complétée par des approches qui mettent l'accent sur la privatisation des espaces publics, sur la diffusion de modèles de type « ensembles résidentiels fermés » et sur la disparité des lieux pratiqués par les individus dans la ville. Le croisement des perspectives architecturales, urbanistiques et d'aménagement avec les analyses socio-historiques des pratiques des usagers devrait contribuer à la compréhension des processus en jeu, notamment auprès des décideurs.

En raison de cette complexification des interactions sociales et des pratiques spatiales, les dynamiques sociales dans les villes sont appréhendées conjointement à différentes échelles spatiales – logement, quartier, centre, agglomération – ou temporelles – quotidienne, pluriannuelle ou séculaire. Il s'agit plus particulièrement de comprendre comment les nouveaux modes d'habiter contribuent à une réorganisation des régions urbaines, en particulier de leurs centralités, et comment en retour ces reconfigurations induisent de nouvelles pratiques de mobilités.

## **Systemes de villes, métropolisation et polycentrisme**

Les processus interdépendants de mondialisation et de métropolisation ont été au cœur d'un courant de travaux sur les systèmes de villes. L'Union Européenne, notamment, a soutenu financièrement des projets de recherche interdisciplinaires et transnationaux sur les modalités de fonctionnement des villes européennes. Les travaux ont mobilisé les modèles classiques de développement des villes, en élaborant des typologies urbaines qui reposent sur des spécialisations fonctionnelles, d'attractivité et d'ouverture internationale. Intégrant différentes temporalités de l'évolution des systèmes de villes, ces recherches ont montré la permanence sur le temps long des hiérarchies urbaines et les vertus heuristiques des théories de la complexité pour affiner la compréhension des processus à l'œuvre.

La notion de polycentrisme continue d'être une grille de lecture importante de la dynamique des systèmes urbains. Répondant à la préoccupation des instances politiques européennes de corriger les effets des déséquilibres territoriaux sur les périphéries engendré par les processus de métropolisation, les questionnements ont porté sur l'évaluation des formes spatiales les plus à même de renforcer la cohésion et l'équité territoriales. Il convient cependant de ne pas réduire la forme des systèmes de villes à un modèle unique car il reste beaucoup à apprendre de la diversité de ces systèmes.

La recherche française a activement contribué au renouvellement des connaissances sur les échanges entre villes (échanges financiers, matériels, immatériels...) et sur les systèmes de villes. Toutefois, la difficulté et le coût d'accès aux données afférentes constituent des obstacles significatifs. Ce champ thématique fécond doit par conséquent être soutenu par la mise en place de conventions entre le CNRS et les organismes détenteurs de données.

## **Formes, ambiances et paysages urbains**

Les recherches sur les formes urbaines se sont longtemps fondées principalement sur la typo-morphologie urbaine, étudiant les relations entre typologie des édifices et morphologie de la ville dans différents contextes politiques, économiques, fonciers et sociaux. Géographes, architectes et urbanistes ont ainsi pu produire des monographies urbaines d'une grande diversité géographique et culturelle. Ces approches jouissent d'un regain d'intérêt important, notamment pour éclairer les rapports des sociétés urbaines à leur environnement naturel et construit à toutes les échelles spatiales et temporelles. Le lien avec d'autres disciplines comme l'écologie urbaine se constitue au-delà des simples dimensions techniques et biologiques, pour appréhender la relation homme-nature dans ses composantes sociale, sensible, culturelle, sanitaire et économique, en intégrant la question des services écosystémiques comme de la production agricole urbaine ou périurbaine. La thématique des formes urbaines tend à se diversifier, par la prise en compte des différentes caractéristiques du peuplement urbain (densités, organisation et distribution spatiales des groupes sociaux), des mobilités quotidiennes, des activités (emplois, services, commerces) et des réseaux de transport.

D'autres thématiques de recherche émergent aussi, s'intéressant aux dimensions sensibles des espaces habités et à leurs cadres matériels et construits, autour des notions de paysage et d'ambiance. Un nombre croissant de laboratoires se saisit de ces domaines en les alimentant selon des approches très diverses. De fait, les ambiances architecturales et urbaines dans leur triple dimension sensible, physique et sociale sont un objet particulièrement propice à l'interdisciplinarité caractéristique de la section 39. Les travaux récents, menés notamment dans le cadre du PIRVE, portent sur les transformations consécutives au développement de la « nature en ville », qui se combine avec d'autres qualités de l'environnement construit convoquant également les pratiques des différents usagers de la ville. En

traitant des rapports sensibles aux territoires de vie, il s'agit en particulier de s'interroger sur la multisensorialité et l'intersensorialité, sur l'articulation entre diverses échelles spatio-temporelles (dynamique territoriale qui englobe le rural, touché par l'étalement urbain), sur l'évolution des cadres socio-esthétiques de la ville, sur l'équilibre des écosystèmes et sur la qualification des espaces publics.

### **Systèmes d'action territoriale**

Le territoire, qu'il soit urbain ou rural (voire « rurbain »), est désormais généralement appréhendé comme une construction sociale, résultant de l'arrangement de multiples composantes (lieux-places, gens-people, institutions), qui met aux prises des acteurs occupant des positions et des rôles divers et porteurs de logiques divergentes, génératrices de conflits. Les caractéristiques de ces territoires et leurs évolutions doivent beaucoup aux actions de ces acteurs (qui ne sont pas tous des « acteurs locaux »), au sein de ce que l'on peut qualifier de systèmes d'action territoriale.

Parallèlement, un ensemble de travaux a porté sur les modes et les modalités de gouvernement et d'administration des territoires, mettant en évidence les inadéquations de leurs formes traditionnelles aux défis contemporains et ouvrant ainsi la voie à des questionnements sur les formes possibles de régulation des tensions et des conflits (coopérations conflictuelles, « coopération », coproduction, etc.). Ces travaux ont révélé les écueils rencontrés par les politiques sectorielles traditionnelles et recensé les exigences des nouvelles politiques intégrées, transversales et à prétention globale (cf. par exemple les politiques de développement durable à toutes les échelles spatiales, les agendas 21 ou, en France, les principes d'action sous-jacents à la LOLF et à la RGPP). Ces recherches mettent en lumière la nécessité de repenser les paradigmes et problématiques, de forger des instruments de mesures, de diagnostics, d'évaluation et de pilotage de l'action, d'envisager le recours à de nouvelles figures et organisations professionnelles et d'élaborer de nouvelles stratégies d'intervention donnant

une plus grande place à des approches ascendantes (*bottom-up*).

Signalons enfin que les gouvernements urbains sont désormais appréhendés par les chercheurs comme des acteurs incontournables de la régulation politique, au sein de systèmes de gouvernance multi-niveau, comme de l'organisation de l'économie à l'échelle planétaire. Le « retour des villes » dans ses implications socio-spatiales à toutes les échelles constitue sans aucun doute un champ de recherche prometteur et important.

## **2.4 INTERNATIONALISATION ET RÉGIONALISATION DU MONDE**

Plusieurs unités de la section 39 sont structurées autour de l'étude d'une partie du monde, tandis que d'autres déploient une part importante de leurs activités sur des terrains étrangers, ou mènent des recherches comparatives qui confrontent des situations parfois très éloignées les unes des autres, en France et à l'étranger, au Nord et au Sud. L'internationalisation croissante de la recherche est reflétée par le nombre de programmes de recherche, de partenariats et de publications à l'international. Ces travaux à l'étranger s'appuient souvent sur des partenariats avec des institutions de recherche locales, ou avec d'autres organismes français comme l'IRD (dont les Unités de Recherche sont en cours d'UMRisation, parfois en lien avec le CNRS), ou encore sur les centres de recherche français à l'étranger, rattachés au CNRS sous la forme d'UMIFRE (Unités mixtes françaises à l'étranger), elles-mêmes en cours de regroupement au sein d'USR (Unités de service et de recherche) structurées à une échelle continentale ou sub-continentale. La mise en place de structures transversales de recherche comme l'Institut des Amériques va dans le même sens. Tous ces éléments contribuent à reconfigurer le paysage scientifique des recherches menées, au sein de la section 39, sur les espaces et les sociétés situés hors de France.

## **Flux et réseaux mondiaux : l'internationalisation des espaces et des sociétés**

La multiplication des flux internationaux et les dynamiques spatiales qui en découlent constituent un premier champ de recherche. Dans un monde caractérisé par une organisation géopolitique en rapide évolution et par l'attractivité croissante de certains pays émergents, les thématiques de la mondialisation et de la globalisation, comme celle de l'internationalisation des échanges, ou encore celle de la « régionalisation » du monde (c'est-à-dire l'émergence de grands ensembles supra-nationaux), ont connu une montée en puissance dans le champ des SHS au cours des deux dernières décennies. Ces notions renvoient à des questionnements classiques pour la section 39, qui ont trait aux façons dont les processus économiques, sociaux et culturels sont susceptibles de transcender les frontières nationales et de transformer les territoires et les sociétés, dans un contexte où le cadre des États nationaux, autrefois prééminent, perd de son importance relative au profit des interactions directes entre le local et le global.

Les recherches portent tant sur les flux d'hommes (à commencer par les migrations internationales, mais en s'élargissant à toutes les formes de circulations transfrontalières, y compris le tourisme) que sur les flux de capitaux, de biens (matières premières, denrées agricoles, produits manufacturés, etc.) ou de services, ou encore sur des flux immatériels (flux d'informations), qui ne structurent pas seulement des espaces virtuels, ou encore de la circulation planétaire des idées, de la culture et des mouvements d'opinion, qui contribuent à façonner un monde de plus en plus « globalisé », même si les signaux ainsi diffusés à l'échelle planétaire se brouillent parfois au cours du processus et se chargent souvent de significations diverses d'une région à une autre. Cette fluidité accrue du monde est rendue possible par l'existence de réseaux structurés à une échelle internationale. Le fonctionnement de ces réseaux est important pour comprendre les logiques de la mondialisation : réseaux urbains (qui constituent le premier des

réseaux et le support de tous les autres), réseaux d'entreprises, réseaux techniques, mais aussi réseaux sociaux, dont on connaît l'importance pour le fonctionnement des migrations internationales par exemple.

Les nombreux travaux menés au sein de la section 39 sur ces flux et réseaux internationaux, matériels et immatériels ont contribué à éclairer les dynamiques spatiales qui découlent de la fluidité et de la « réticularité » croissantes du monde, y compris les formes de réorganisation des systèmes productifs à l'échelle mondiale.

## **Découpages et régionalisations du Monde**

Les découpages traditionnels du monde reposent sur une logique continentale (l'Europe, l'Afrique...), maritime (la Méditerranée, la Caraïbe...), économique (le « Nord » et le « Sud »...), politique (l'Union Européenne, le Mercosur...) ou encore sur une logique « d'aires culturelles », supposées homogènes (l'Amérique latine, le monde arabe...). Ces découpages par grands ensembles offrent une trame assez rigide, souvent dépassée par la rapidité de l'évolution géopolitique du monde et par la logique même de la diffusion spatiale des phénomènes observés.

Le cas de l'Europe, qui mobilise un nombre croissant de chercheurs au sein de la section 39 et qui bénéficie de financements de recherche en pleine expansion, illustre parfaitement la rapidité des recompositions territoriales à l'échelle planétaire ; une évolution qui constitue un objet de recherche en soi. En effet, avec l'élargissement de l'Union Européenne, la question de la définition conceptuelle de l'Europe est posée, notamment par des travaux portant sur les limites de l'Europe. Cette question se décline aujourd'hui souvent en termes d'articulation et de mises en réseaux, à l'image des discussions actuelles sur la construction d'un espace euro-méditerranéen. À l'échelle européenne, l'étude des dynamiques territoriales et sociales se décline souvent sur des thématiques spécifiques. Citons notamment : la reconversion des anciens foyers industriels ;

la résilience du modèle urbain européen; l'arrimage des espaces périphériques au centre européen; les coopérations régionales à l'intérieur de l'espace communautaire ou entre l'Europe et les régions voisines (Turquie, pays de l'ex Bloc de l'Est) ou encore la mobilité croissante des populations en Europe et les recompositions de leurs espaces de vie. L'espace européen est également investi largement par les études portant sur l'évolution des réseaux urbains, des réseaux de transports ou des stratégies territoriales des entreprises par exemple.

Les questions de compétitivité et de cohésion du territoire européen occupent une place importante dans les recherches. Les régions et les villes européennes sont de ce fait analysées au travers d'un grand nombre de facteurs qui permet de qualifier leurs performances socio-économiques et d'évaluer les dynamiques contemporaines de développement du territoire européen, entre des formes de monopolisation qui renforcent les grands centres métropolitains et des formes plus polycentriques qui favorisent un aménagement territorial plus équilibré.

Dans cet ensemble européen, le regard porté sur l'Europe ex-communiste, souvent nommée Europe centrale et/ou orientale, a évolué. Pendant une décennie, et alors que les catégories «Est» et «Ouest» étaient encore vivaces, c'est essentiellement la sortie du communisme et la notion de «transition» qui ont polarisé l'attention, à travers des travaux sur les recompositions de l'organisation administrative et territoriale, de l'agriculture et des espaces ruraux, des réseaux urbains et de l'organisation des villes, des systèmes de transport, des régions frontalières, des phénomènes migratoires ou encore des questions identitaires et minoritaires. Aujourd'hui, alors que la majeure partie de ces États ont été intégrés à l'Union Européenne ou ont développé avec elle des partenariats étroits, la préoccupation majeure est celle de la convergence ou non des évolutions observées dans les nouveaux et dans les anciens États membres. Une part importante des travaux actuels porte sur l'«européanisation» de cette partie de l'Europe,

qui contribue à effacer en partie les catégories anciennes de l'Est et l'Ouest.

Hors d'Europe, plusieurs grands ensembles régionaux continuent de s'affirmer comme des périmètres d'étude pertinents: l'Amérique du nord (États-Unis et Canada principalement); l'Amérique latine (incluant ou non la Caraïbe); le Maghreb, le Machrek et/ou le Monde arabe; l'Afrique subsaharienne (au sein duquel l'espace francophone est traditionnellement davantage investi); la Péninsule indienne, l'Himalaya, l'Australasie, le Japon et, désormais, la Chine. Un même espace peut d'ailleurs appartenir à plusieurs ensembles régionaux renvoyant chacun à des questionnements spécifiques.

En outre, des espaces autrefois peu investis par la section 39 y prennent progressivement leur place. Mentionnons en particulier: l'Afrique anglophone (notamment orientale et méridionale); les espaces de confrontation et formes d'intégration dans les Amériques (Mexique – États-Unis, espace caraïbe, nouvelles ententes régionales comme le Mercosur ou la CAN); les pays et régions issues du démantèlement de l'ancien bloc de l'Est; le golfe persique qui est devenu aujourd'hui un espace aussi contrasté que peut l'être le bassin méditerranéen; la Chine et son aire d'influence qui ne cesse de s'étendre, en Asie méridionale et au-delà; etc.

Les «aires culturelles» restent partiellement structurantes au sein de la section et l'identité d'une part non négligeable des unités reste fortement définie par l'étude pluridisciplinaire et plurithématique de telle région du monde. Il est à noter pourtant que, dans les réponses à l'enquête menée en septembre 2009, la notion d'aires culturelles n'a guère été mise en avant. Cela reflète le fait qu'une part croissante des recherches menées dans des régions hors de France et hors d'Europe présente un ancrage davantage thématique que régional. En contrepartie, l'éclatement des pays du «tiers-monde» n'a pas donné lieu à de nouveaux schémas explicatifs de l'état du monde; les constats sur la pauvreté et la marginalisation grandissante de certaines parties du globe, tout comme l'observation des éco-

nomies émergentes, ne peuvent occulter le manque de vision globale sur les transformations de ce qu'on a appelé un temps le « système-monde ».

## 2.5 MÉTHODES ET OUTILS

Du fait de son large spectre disciplinaire et thématique, la section 39 mobilise des méthodes et outils divers. Outre les développements spécifiques relatifs à l'analyse spatiale et la modélisation, aux démarches qualitatives, et à la constitution et la mise à disposition de bases de données et de corpus, un enjeu actuel important a trait à l'intégration de ces méthodes et outils.

### Analyse spatiale et modélisation

De nombreux laboratoires de la section 39 s'inscrivent dans une démarche méthodologique fondée sur l'analyse spatiale et la modélisation en recourant à des outils tels que les systèmes d'information géographique. Cette caractéristique est d'ailleurs partagée avec d'autres champs disciplinaires au sein desquels l'étude de la dimension locale des phénomènes, notamment environnementaux, implique la prise en compte des diverses échelles spatiales et temporelles. Cette tendance est accentuée par l'importance croissante des processus de recherche collectifs et dans certains cas finalisés, mis en œuvre par des programmes à vocation interdisciplinaire et au sein de structures institutionnelles pluridisciplinaires qui fédèrent les laboratoires (Maisons des Sciences de l'Homme INSHS, Observatoires des Sciences de l'Univers INSU, Observatoires Hommes-Milieu INEE).

La production de données spatiales issues de dispositifs de terrain, de plateformes aériennes et satellitaires est un enjeu d'actualité renouvelé par un contexte technologique extrêmement actif. Par exemple, la multiplication des capteurs de résolutions spatiale et

spectrale de plus en plus fines, favorise *a priori* la connaissance des milieux. Néanmoins cette disponibilité de données multi-sources, multi-résolutions et multi-dates, impose la mise au point et l'utilisation de techniques adaptées à l'extraction d'informations géographiques pertinentes, à la fusion de données hétérogènes, à l'assimilation dans des modèles ainsi qu'une mise en œuvre de techniques d'analyse de données spécifiques. Si les bases de données 2D restent fondamentales, la 3D est en plein essor, au niveau tant du mode de représentation (modèles paysagers, modèles de diffusion, environnements virtuels et « réalité augmentée »...) que de sa perception par différents groupes d'acteurs dans des processus participatifs visant à sensibiliser le public aux enjeux territoriaux. Enfin, dépassant la mise à disposition d'informations « brutes », la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des systèmes dans lesquels nous évoluons rend indispensable la mise au point de modèles dynamiques.

Avec la mise à disposition d'un nombre croissant de données désagrégées et l'intérêt grandissant accordé à l'espace vécu, au rôle des représentations individuelles et collectives dans les dynamiques spatiales, à la fabrique des territoires par et pour les groupes et individus, l'analyse spatiale et la modélisation se sont largement ouvertes aux relations individus-espace, sans délaisser pour autant l'analyse du fonctionnement des territoires. L'analyse spatiale supportée par les techniques de recueil des comportements spatiaux *via* le GPS permet de décrire finement les contextes de vie des groupes sociaux et des individus en attachant une place toujours plus importante aux micro-échelles. Par ailleurs, les méthodes de géosimulation ont connu un net développement en recherche fondamentale et appliquée. La plupart des modèles réalisés au cours de ces dernières années consistent en des protocoles de simulations individus-centrés destinés à appréhender les navettes, les déplacements de consommation ou de loisirs d'individus. Dans certaines recherches concernant les déplacements individuels quotidiens, en milieu urbain notamment, la *time geography* a été retenue comme cadre conceptuel et forma-

lisée à travers la simulation multi-agents. D'autres travaux, plus récents et en plein développement, utilisent les systèmes multi-agents dans une modélisation d'accompagnement des processus de concertation. Les géosimulations sont également utilisées à des fins d'aménagement et de prospective, qu'il s'agisse de modèles d'automate cellulaire ou de modèles spatio-morphologiques destinés à comprendre le fonctionnement territorial et anticiper les transformations de l'occupation des sols et des territoires de pratiques. Parallèlement et toujours dans une optique d'aide à la décision, à la médiation et à l'apprentissage, de nouvelles recherches sont engagées en statistiques ainsi qu'en analyse d'images, pour forger des indicateurs d'état ou de suivi de transformations. Les applications dédiées à des territoires à fort enjeu environnemental (villes, littoraux, espaces naturels très fréquentés...), actuellement en plein développement, obligent aussi à prendre du recul et à mener des analyses réflexives quant à l'usage et à l'opérationnalité de ces démarches fondées sur les technologies de l'information géographique.

Notons enfin que le couplage croissant de données agrégées et désagrégées, d'informations émanant de sources de natures diverses, d'échelles différentes, et souvent caractérisées par une forte variabilité tant dans la connaissance du fonctionnement des phénomènes que dans la précision de leur localisation, exige d'inventer de nouvelles méthodes de spatialisation et de modélisation intégrant de manière plus robuste l'incertitude et l'aléatoire.

## Démarches qualitatives

L'exploration et le développement de méthodologies qualitatives originales en matière d'études des dynamiques territoriales et des pratiques spatiales représentent une évolution récente notable. Articulées de manière croissante à des approches quantitatives, ces démarches visent souvent à se situer au plus près de l'expérience habitante, en proposant de rendre compte de la relation qu'entretiennent les individus à leur cadre de vie. Elles

sont apparues sous l'impulsion des questions de gestion environnementale qui amènent à devoir appréhender conjointement les dimensions techniques, physiques et matérielles des territoires et les dynamiques politiques, sociales et culturelles qui s'y déploient et qui les transforment.

Sont ainsi étudiées les représentations, les perceptions et les pratiques constitutives du vécu quotidien d'un territoire, de sa production, de sa préservation, voire de sa compétitivité. Empruntant à de nombreux champs disciplinaires tels que microsociologie, psychologie environnementale, géographie sociale, anthropologie urbaine ou éthologie humaine, ces méthodologies se traduisent dans des dispositifs d'enquête et dans des catégories d'analyse parfois très spécifiques, ainsi que dans la mise en œuvre de quasi-expérimentations. Une place fondamentale est accordée au contexte et à l'inscription spatiale et temporelle des vécus habitants.

C'est ainsi que de nombreux travaux se fondent sur des approches *in situ* qui permettent, dans certains cas, d'observer dans leur réalité concrète les pratiques habitantes et, dans d'autres, de faire varier la nature, la forme, la structure, l'histoire des espaces ainsi que toutes caractéristiques de contexte conditionnant le vécu et les dynamiques habitantes. Un des enjeux importants est de mettre à jour les processus à partir desquels des contextes spatio-temporels s'articulent à des appartenances socio-culturelles. Il en va également ainsi de la prise en compte accrue des dynamiques temporelles dans l'analyse socio-spatiale.

Il convient, par ailleurs, de mentionner la part croissante des outils multimédias et de divers supports matériels (photographies, cartes, enregistrements sonores et vidéo-graphiques...) au sein des dispositifs d'enquête et d'analyse. Ces outils contribuent non seulement à renouveler les approches de terrain et l'appréhension des interactions enquêteur-enquêtés mais également à accroître la précision des données contextuelles. Ces médiations techniques sont d'autant plus utiles et pertinentes qu'un ensemble croissant de recherches traite des environnements sensi-

bles urbains et des engagements esthétiques situés.

L'approche qualitative dans la construction d'outils de recueil de données des pratiques, des représentations et des conduites des groupes et des individus, impose dans certaines circonstances, de renouveler la forme et le contenu des techniques (*focus group*, observation discrète ou embarquée, etc.). C'est le cas des techniques de recueil de données labiles, le cas aussi de recherches s'intéressant aux phénomènes sensibles et aux nouvelles formes de communication (utilisation de forums, du Web) ou encore les situations d'enquête impliquant des populations concernées par des phénomènes spécifiques sollicitant régulièrement les chercheurs (cas de la santé, des inégalités sociales et environnementales, de la jeunesse, etc.).

Soulignons enfin que la mobilité n'apparaît pas seulement comme objet de recherche mais également comme condition concrète de l'investigation. Nombreuses sont les propositions qui mettent en œuvre le déplacement, les trajets ou le mouvement comme cadre pragmatique de saisie d'un terrain. La marche est le mode de déplacement privilégié au sein de ces techniques d'enquête dynamiques.

En prenant la mesure de la complexité des phénomènes étudiés, ces méthodologies reposent souvent sur des triangulations multiples. Utilisées conjointement, elles enrichissent les données de terrain et peuvent faciliter les analyses comparatives. Dans les démarches interdisciplinaires, elles favorisent les analyses multi-niveaux, la complémentarité des dimensions prises en compte dans les processus observés et la construction inductive de théories ou de modèles.

### **Bases de données et corpus : contribution, usages**

Dans le contexte actuel où les liens entre sciences et sociétés sont de plus en plus débattus, la disponibilité de connaissances perfectibles et appropriables *via* des plateformes

interopérables accessibles par le web devient indispensable (cf. la directive européenne *Inspire*). Il convient de réfléchir sur les pratiques de recherche, la qualité et la nature de l'information diffusée, les conditions de son appropriation sociale. Les chercheurs en sciences sociales amènent des points de vue épistémologiques spécifiques et développent de plus en plus souvent des perspectives conjointes avec les chercheurs qui utilisent les outils de la lecture spatiale. Le développement des approches qualitatives et géomatiques nécessite des corpus importants et diversifiés : textuels, iconiques, audio-visuels, bases d'information géographique. La constitution de ces corpus est un domaine important de recherche et d'innovation technologiques : indexation informatisée de textes et d'images, traitement des documents audio-visuels, traitements croisés entre bases de données...

En ce qui concerne l'information géographique, le besoin exprimé au niveau international de mise à disposition du public de données de meilleure qualité pour l'élaboration et la mise en œuvre des politiques ayant un impact direct ou indirect sur l'environnement conduit actuellement à la mise en œuvre d'Infrastructures de Données Spatiales (IDS). À l'échelle nationale, les auteurs du présent rapport se félicitent de la facilitation progressive de l'accès aux données géoréférencées produites par divers organismes publics et appellent à la poursuite de ce mouvement. À l'échelle locale, les chercheurs déplorent la difficulté à mener une analyse spatialisée des données issues du recensement de la population rénové dont la collecte est échelonnée sur plusieurs années et dont l'échantillonnage n'est pas exhaustif en contexte urbain.

## **3 – ENJEUX TRANSVERSAUX**

Le rapport de conjoncture de 2004 de la section 39 comportait un recensement d'enjeux

transversaux méritant «une grande vigilance au cours des années à venir».

Six ans plus tard, certains de ces enjeux sont devenus des thématiques structurantes de la section. Il en va ainsi des questions de «mobilités, migrations et nouvelles configurations socio-spatiales»; d'informations et traitement de données; et dans une certaine mesure du «rapport du territoire au politique» (une proportion croissante et désormais importante des unités de la section, par exemple, affiche la science politique comme l'une de ses disciplines de référence).

D'autres thèmes continuent de traverser les différents domaines de recherche de la section: échelles et niveaux d'organisation; dynamiques et temporalité – prenant un relief particulier à l'heure des changements environnementaux planétaires et du dévelop-

pement durable – mais aussi la «question de l'image».

Une piste de réflexion complémentaire mérite peut-être d'être mentionnée en conclusion du présent rapport. Elle découle du renouvellement progressif des paradigmes relatifs aux «savoirs scientifiques en société». À la question de l'usage du savoir se combine désormais celle de la genèse de savoirs hybrides, à l'articulation entre savoirs savants, experts et ordinaires. Cette question prend un relief particulier pour la section 39 dont les questionnements de recherche entretiennent des liens étroits avec l'action collective (aménagement de l'espace, urbanisme, politiques environnementales ou migratoires, etc.) Une interrogation réflexive sur les tenants et les aboutissants de ces savoirs hybrides apparaît donc comme un champ prioritaire d'investigation collective.

## ANNEXE 1 : SIGLES

CAN	Communauté Andine
ERL	Équipe de recherche labellisée
FRE	Formation de recherche en évolution
GDR	Groupement de recherche
GPS	Global Positioning System (système satellitaire de géolocalisation)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ITA	Ingénieurs, techniciens, administratifs
MEEDDM	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Mercosur	«Marché commun du Sud» (communauté économique des pays d'Amérique du Sud)
MSH	Maison des sciences de l'homme
PIRVE	Programme interdisciplinaire de recherche Ville et Environnement (CNRS-MEEDDM)
UMI	Unité mixte internationale
UMIFRE	Unités mixtes des instituts français à l'étranger
UMR	Unité mixte de recherche
UMS	Unité mixte de services
UPR	Unité propre de recherche
USR	Unité de service et de recherche

# 40

---

## POLITIQUE, POUVOIR, ORGANISATION

### *Président*

Patrick MICHEL

Joël ANDRIANTSIMBAZOVINA

Benoît BASTARD

Christine CAZENAVE

Jean-Gabriel CONTAMIN

Olivier COSTA

Gilles FAVAREL-GARRIGUES

Franck FREGOSI

David GARIBAY

Jean-Philippe HEURTIN

Catherine HONNORAT

Olivier IHL

Sandrine LEFRANC

Viviane LE HAY

Thomas LINDEMANN

Marc LORIOU

Catherine MARRY

Christine MUSSELIN

Gwenaëlle ROT

Laurence ROULLEAU-BERGER

Jens THOEMMES

La section 40, « politique, pouvoir, organisations », regroupe les chercheurs, ingénieurs et techniciens dont l'activité s'exerce essentiellement dans les domaines de la science politique (sociologie politique, institutions publiques, relations internationales, politiques publiques) et de la sociologie du travail, des organisations et des activités économiques.

226 chercheurs y sont à ce jour affectés. Le présent rapport ne revient pas sur le détail de la situation démographique de la section, qui a fait l'objet dans le précédent rapport de conjoncture d'une note de synthèse concernant les personnels chercheurs. Les tendances, à maints égards alarmantes, mises en évidence alors n'ont pas depuis été inversées.

Le tableau est ici complété par une note concernant la situation des personnels ingénieurs et techniciens (voir annexe), dont les conclusions ne peuvent que renforcer l'inquiétude.

Afin de mieux identifier les enjeux prioritaires, on distinguera trois grandes thématiques scientifiques :

- science politique et sociologie politique,
- politique comparée et relations internationales,
- sociologie du travail, des organisations et des activités économiques.

Un regard d'ensemble porté sur ces champs et sous-champs disciplinaires conduit

à s'intéresser, dans un second temps, à quatre questions transversales, autour de l'intégration méthodologique, de la « sociologie générale », de l'internationalisation, enfin des liens entre recherche, enseignement et expertise, question au cœur des évolutions de la recherche et de l'enseignement supérieur.

## **1 – LES GRANDES THÉMATIQUES D'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE**

### **1.1 SOCIOLOGIE POLITIQUE**

La science politique a connu durant les quinze dernières années de fortes évolutions. Bien des domaines qui lui étaient auparavant étrangers structurent aujourd'hui une grande part de ses activités. Une autre de ses caractéristiques majeures est la vigueur des réseaux et des recherches comparées.

Les puissantes dynamiques sous-disciplinaires qui alimentent ces évolutions sont susceptibles d'être interprétées comme conduisant à une atomisation de la discipline, chaque domaine ayant tendance à s'institutionnaliser de façon autonome, se dotant d'un vocabulaire et d'une syntaxe propres, et prenant ainsi le risque d'un enfermement relatif.

Une seconde tendance semble toutefois à l'œuvre, jusqu'à un certain point en tension, sinon en contradiction, avec la précédente, et qui déboucherait sur une réinscription de la science politique au sein d'une sociologie générale au renouvellement de laquelle elle participerait de ce fait.

Parmi les courants porteurs on peut, notamment, mentionner :

– La sociologie des mobilisations et des modes d'action collective, qui tout en s'appuyant sur l'acquis des écoles américaines (sociologie dite de la mobilisation des ressour-

ces, des cadres de perception, etc.) a su se développer de façon originale, en mettant l'accent sur la combinaison des formes classiques et nouvelles de protestation et en soulignant l'importance des échanges avec les acteurs politiques traditionnels. Dans ce domaine, la recherche française contribue aux principaux débats internationaux du domaine.

– La sociologie des partis politiques constitue un domaine de recherche traditionnel en France, qui attire aujourd'hui un regain d'investissement même si les travaux portant sur les partis de la droite modérée restent rares. Ce domaine s'est enrichi par le rapprochement avec le courant d'analyse des mobilisations militantes et des approches localisées du phénomène partisan qui mettent l'accent sur l'inscription sociale des organisations partisans. Il a également été renouvelé par des études portant sur les clivages et le rôle des partis dans la façon dont les personnes se repèrent dans l'espace politique. L'enjeu aujourd'hui est à la fois de saisir la transformation du phénomène partisan afin de reconsidérer son rôle dans les processus de politisation et de confronter plus systématiquement les travaux menés en France avec les débats internationaux.

– La sociologie de l'action publique est un secteur particulièrement productif qui a su construire des démarches originales. Elle s'est en particulier démarquée des productions anglo-saxonnes en contribuant à la sociologie de l'État et de la sociologie politique en général, les travaux comparatifs portant majoritairement sur les pays européens. Des innovations conceptuelles lui donnent une bonne visibilité internationale. Les travaux sectoriels (par grands types de programme d'action publique menés par l'État) sont aujourd'hui complétés par des analyses abordant l'action publique comme une action collective où l'État n'est plus qu'un acteur en interaction avec d'autres (acteurs économiques, collectivités locales, mouvements sociaux). Les travaux de sociologie des acteurs, en particulier ceux portant sur les élites bureaucratiques et les groupes d'intérêts organisés, sont particulièrement abondants.

– La question du genre a longtemps fait partie des domaines pour lesquels la science

politique française manifestait un retard par rapport aux travaux menés ailleurs. Depuis quelques années, la situation s'améliore avec l'apparition de travaux qui s'intègrent dans les courants de réflexions internationaux. Par définition, la question du genre constitue un objet transversal qui concerne la totalité des domaines de recherche : sociologie électorale (le vote des femmes), des mobilisations, des partis et des institutions politiques (les mouvements féministes, la place des femmes au sein des partis, des organes de l'État, de l'élite administrative, etc.), les politiques publiques (la dimension générée des régimes d'État-providence), etc. Mais l'approche en termes de genre renvoie également aux enjeux plus larges de la relation entre sphères publique et privée : le genre est ainsi au cœur de la réflexion sur les modèles de citoyenneté, la constitution des sexes en groupes sociaux, ou les rapports sociaux de sexe ; il touche aussi directement les politiques de la sphère privée (contraception, procréation assistée, avortement, mariage et adoption concernant des homosexuels, etc.). Le genre contribue ainsi aux transformations des fondements de l'ordre politique.

– Les études européennes ont connu ces dernières années un fort développement. La science politique française a su s'insérer dans un champ en voie de constitution jusque là largement dominé par les approches anglo-saxonnes. L'approche française a ouvert de nouveaux terrains d'enquêtes empiriques, et proposé de nouvelles voies de recherche particulièrement fécondes. Elle se distingue d'abord en mettant l'accent sur l'analyse des acteurs sociaux et politiques, et sur les organisations qui contribuent à donner forme au nouvel espace politique qui se dessine au niveau européen. La spécificité théorique de l'apport de la science politique française – et qui commence à lui valoir une reconnaissance internationale, encore à soutenir toutefois – est aussi d'avoir su marier des approches de sociologie du droit et des professionnels des institutions européennes, et des approches de socio-histoire qui permettent de mieux comprendre le processus de formation de cet espace et les modalités qui lui confèrent sa consistance sociopolitique.

**Les voies d'une évolution de la sociologie politique passent, au-delà d'une réflexion sur les rapports entre science politique et sociologie générale et d'une nécessaire interrogation sur ses méthodes – aspects sur lequel on reviendra –, notamment par :**

**– *Un encouragement au développement de la sociologie historique du politique***

Marqué par des travaux doctoraux en augmentation constante et des revues et collections spécialisées (Belin, *Genèses*, etc.), le développement de la sociologie historique est en France encore récent (rapporté notamment à la situation aux États-Unis), et pour l'essentiel associé à la science politique (davantage qu'à d'autres sciences sociales). Ce développement est donc encore fragile et semble stagner du point de vue des recrutements dans les facultés et les IEP du fait des besoins d'enseignements dans des matières plus classiques (relations internationales, analyse des politiques publiques...). D'où l'importance stratégique de son développement au CNRS.

Il importe en même temps que l'approche socio-historique ne se spécialise pas non plus en sous-discipline. En effet, il s'agit d'une part à la fois d'éviter à la fois un enferment sur lui-même de ce type d'approche et de favoriser sa dissémination dans d'autres branches de la science politique. Mais il s'agit aussi d'autre part de préserver le rôle que cet ensemble de méthodologies et de savoirs joue comme passerelle avec d'autres disciplines, comme l'anthropologie, l'histoire, l'économie. Ce qui apparaît comme une des spécificités des sciences sociales en France doit être préservé.

Il convient enfin d'encourager la sociologie historique comparative. Ce champ de recherches permet en effet de mieux répondre aux attentes de collaboration internationale et de favoriser à la fois une présence des sciences sociales françaises dans un secteur en expansion tant aux États-Unis que dans d'autres pays européens, et d'y faire entendre leur voix particulière.

– **Une réflexion renouvelée sur les rapports entre philosophie politique et sociologie politique**

Alors que, longtemps, l'histoire des idées politiques, la philosophie ou la théorie politique se sont effacées à la fois intellectuellement et institutionnellement du paysage de la science politique, que l'analyse des phénomènes politiques s'est largement désintéressée des « idées », des « idéologies » ou des représentations, depuis quelques années on a vu, à rebours, un retour des facteurs « cognitifs » et des cadres idéels dans les recherches (par exemple avec les notions de « paradigme » ou de « référentiel » en politiques publiques, de « cadres d'interprétation » en sociologie des mobilisation, etc.). Dans le même temps, on a pu constater un renouveau de l'analyse des idées politiques, marqué par l'apparition de nouvelles revues, par un retour des recherches en théorie politique, mais également par un intérêt renouvelé pour les débats – essentiellement anglo-saxons ou germaniques – sur les manières de faire l'histoire des idées politiques. On observe également la création de séminaires et l'émergence de recherches, dont les intitulés se revendiquent d'une « socio-histoire des idées politiques » ou d'une « histoire sociale des idées politiques ».

Ces éléments doivent conduire à reconsidérer les rapports entre philosophie politique et sociologie politique. De ce point de vue les dialogues qui se sont instaurés, par exemple, entre sociologie et pragmatisme, entre politiques publiques et théories de la justice, ou entre la théorie politique et la sociologie du débat public démocratique, sont autant d'invites à repenser les modèles d'articulation entre philosophie et science politique.

**Parmi les champs de recherche où des travaux sont à encourager on peut citer :**

**La socialisation et les sociabilités politiques :** à la fois comme processus d'acquisition précoce des catégories et mécanismes du jugement politique chez les enfants, qui implique une analyse de l'articulation entre les différents espaces de socialisation primaire

(la famille, l'école et les pairs en particulier) ; mais aussi comme processus en œuvre sur l'ensemble de la vie, impliquant des phénomènes de retraduction et transformation des valeurs et des catégories de compréhension du monde qui impliquent d'autres agents de socialisation comme le milieu professionnel, les médias, le milieu associatif, les réseaux de sociabilité, mais aussi des agents proprement politiques comme les partis. Les travaux concernant la socialisation politique n'ont pas fait l'objet d'enquêtes approfondies depuis les recherches d'A. Percheron et A. Muxel, et la section 40 a voulu encourager de telles enquêtes en distinguant dans le concours 2010 un projet portant sur ce thème. Il semblerait également utile de profiter des recherches menées en sociologie de la sociabilité pour renouveler et approfondir la réflexion sur ces thèmes.

**Les institutions :** en France, la notion d'institution n'a guère le vent en poupe dans les sciences sociales contemporaines, alors qu'elle était centrale dans les études du politique jusque dans les années 1970, et qu'elle le reste pour les spécialistes de droit constitutionnel ou de science administrative. L'étude des institutions a néanmoins connu un regain à la faveur notamment de l'importation dans les années 1990 du néo-institutionnalisme anglo-saxon dans les sciences sociales françaises, ainsi que de l'émergence de la socio-histoire du politique. Si de nombreux travaux ont été consacrés à la genèse des institutions, à leurs perceptions, à leurs acteurs, les recherches systématiques et comparatives manquent, y compris sur des objets apparemment aussi centraux que le Parlement, la Présidence de la République, les institutions européennes, etc., souvent abandonnés à d'autres disciplines comme le droit.

Une sociologie politique des institutions devrait en premier lieu mettre l'accent sur le droit qu'elles produisent et ses effets de légitimation, les contraintes qu'il impose, les croyances qu'il engendre. Elle suppose aussi d'analyser les conditions de production, d'usage du droit, au travers des interactions de ceux qui s'en saisissent. Elle devrait, en outre, insister sur les institutions comme

formes d'action : il paraît en effet important d'observer les pratiques les plus quotidiennes de ceux qui endossent les rôles institutionnels, et la façon dont se négocient le formel et l'informel, la règle et son adaptation où s'entre-définissent rôle institutionnel et rôle de l'assujetti. Il s'agirait enfin d'analyser les formes d'obéissance et d'adhésion que réclament et suscitent les institutions, et les conditions de leur émergence.

L'entrée par les institutions peut permettre l'inscription de la sociologie politique française dans les grandes enquêtes comparatives dont elle est aujourd'hui fréquemment absente, en affirmant aussi une spécificité sociologique et socio-historique de son approche. Elle peut permettre également d'ouvrir ou d'entretenir un dialogue fructueux avec des disciplines voisines : sociologie du droit et histoire, notamment.

**La sociologie électorale :** La sociologie électorale qui a été le premier domaine d'excellence de la science politique française, connaît une relative crise : crise de ses modèles et aussi sans doute de ses méthodes. Il semblerait important de remettre sur le métier la question du vote et de ses déterminants. Une des voies de renouvellement de la question serait sans doute de contourner les approches trop uniment individualistes et celle travaillant par agrégation (avec l'instrument du sondage national). Cela signifie, en d'autres termes, qu'il faudrait à la fois re-sociologiser l'approche de l'acte électoral, et le localiser. Mais cette approche signifie aussi de renouer avec des traditions quelque peu oubliées comme les approches environnementales de l'acte de vote. Elle signifie également réfléchir à d'autres méthodes de recherche, et en particulier s'intéresser aux diverses formes d'ethnographies du vote.

La contribution que la science politique française pourrait apporter en ce domaine – attendue au travers de plusieurs enquêtes ANR en cours – permettrait de faire communiquer des sous-domaines jusque-là relativement imperméables : mobilisations et action collective, politisation, sociabilité. Elle autoriserait en outre un dialogue plus serré avec la géographie électorale (qui a pu, ça et là, faire fructifier un certain héritage siegfriedien). Enfin, elle ouvri-

rait à nouveau la sociologie électorale française à des approches similaires ou avec lesquelles il est possible de dialoguer, en particulier aux États-Unis.

## 2 – LES RELATIONS INTERNATIONALES, LA POLITIQUE COMPARÉE ET LES ÉTUDES EUROPÉENNES

### 2.1 LES RELATIONS INTERNATIONALES

Les relations internationales comme sous-discipline de la science politique sont traditionnellement développées dans les pays anglo-saxons et les pays scandinaves. Dans la communauté mondiale des internationalistes qui compte aujourd'hui plusieurs milliers d'enseignants-chercheurs, le champ des relations internationales désigne l'étude des interactions des acteurs agissant au-delà des frontières. Cette étude peut aussi bien concerner les rapports interétatiques, les interactions entre acteurs non étatiques et étatiques, ou acteurs non-étatiques entre eux (par exemple les mobilisations transnationales contre l'armement nucléaire). En revanche, dans le cadre français la recherche en relations internationales est souvent assimilée à l'étude des pays étrangers – les *area studies*. Une autre particularité française réside dans le fait que les formations de troisième cycle en relations internationales sont souvent dirigées par des non-politistes qui assimilent la recherche en relations internationales à la « géopolitique », une approche qui ne bénéficie d'aucun statut scientifique dans le monde académique des internationalistes. Le présent rapport se donne pour objectif d'exposer uniquement la situation de la recherche dans le domaine des relations internationales tel qu'il est généralement accepté dans la communauté académique internationale des politistes.

Un bilan quantitatif révèle que seule une petite minorité de chercheurs associés aux centres de recherche travaillant sur l'international se consacrent aux relations internationales proprement dites. Très souvent, les chercheurs pratiquent les *area studies*, les études européennes... Alors que dans les départements de science politique aux États-Unis, la sous-discipline des relations internationales accapare au moins un cinquième des postes, en Allemagne environ un tiers ou au moins un quart, dans les recrutements en France de maîtres de conférences et des professeurs des Universités, seul environ un candidat sur dix relève des relations internationales au sens strict du terme. La situation n'est pas très différente au sein du CNRS. Lors du recrutement des chercheurs de 2009 et de 2010, aucun candidat sélectionné n'avait ainsi un profil de relations internationales.

Malgré leur petit nombre, les internationalistes français se sont engagés dans des recherches stimulantes qui ont même trouvé une certaine résonance internationale. Un grand nombre d'entre eux se réfèrent à une sociologie politique internationale. Celle-ci refuse une coupure « épistémologique » entre l'interne et l'externe. Elle est particulièrement attentive aux actions des acteurs non-étatiques, et se réfère moins aux courants théoriques internationalistes qu'aux sociologues et philosophes (Durkheim, Bourdieu, Foucault ou Honneth). Les sujets les plus divers sont abordés par les chercheurs français : l'analyse décisionnelle de la politique étrangère, les origines de la guerre, la sociologie militaire, la « sécuritisation » des politiques publiques et la construction sociale du terrorisme, l'économie politique internationale, les mobilisations transnationales, les politiques publiques internationales, la sociologie des élites, les politiques européennes, la sociologie des fonctionnaires de l'ONU, la gestion des crises ou encore la médiation. La diversité des sujets abordés est presque aussi grande que le nombre de chercheurs. Au-delà de cette diversité, on constate néanmoins une méfiance commune envers des généralisations théoriques et un penchant vers des études microsociologiques des acteurs internationaux.

Parmi les points forts des relations internationales en France, il convient d'abord de souligner la productivité considérable de ce faible effectif de chercheurs. Ils publient des manuels, des monographies ou des articles dans des revues telles que la *Revue française de science politique*, *Critique internationale*, *Culture et conflits*, *International Political Sociology* et de manière grandissante aussi dans des revues étrangères. (Notons que la revue *International Political Sociology* est dirigée par un politiste français). Un autre point fort de la recherche académique en relations internationales est son ouverture envers les autres sous-disciplines de la science politique comme la sociologie politique, les politiques publiques et même la philosophie politique. La marginalité relative des relations internationales en France présente à certains égards aussi des avantages. Plus que leurs collègues étrangers, les chercheurs en France se révèlent très critiques des approches anglo-saxonnes jugées trop formelles et rigides. Enfin, au niveau institutionnel international, par exemple au sein de l'ISA et de l'ECPR, des progrès ont été accomplis qui pourraient contribuer à une plus forte internationalisation de la recherche en relations internationales en France.

La faiblesse des relations internationales tient essentiellement à ses effectifs très réduits (à titre d'exemple, lors du congrès annuel de l'International Studies Association, on comptait une vingtaine de Français sur environ un millier d'intervenants). Cette faiblesse les rend vulnérables aux prétentions des autres sous-disciplines de la science politique. Les postes fléchés en relations internationales sont convoités par une majorité de candidats non formés à cette discipline. Les institutions sont loin de décourager de telles candidatures, au risque de recruter des « internationalistes » qui possèdent un faible bagage intellectuel dans cette discipline. Il faut souligner en effet que la sous-discipline est l'un des domaines les plus développés de la science politique mondiale avec l'usage de méthodologies très sophistiquées et une pléiade d'ouvrages de référence, de revues et de congrès. En outre, les formations proposées et notamment méthodologiques doivent être renforcées pour établir

fermement le caractère scientifique de cette sous-discipline.

### **Proposition de programmes prioritaires**

#### **La méthodologie en relations internationales**

Le nombre de thèses relevant spécifiquement des relations internationales est faible en France. Il convient d'encourager la formation des doctorants internationalistes et de renforcer le dispositif méthodologique. D'une part, l'enseignement des méthodes quantitatives est souhaitable et permettra de comprendre un grand nombre de publications anglo-saxonnes. D'autre part, des méthodologies plus « qualitatives » et historiques (comme la méthode de la comparaison structurée et ciblée d'Alexander George) méritent toute l'attention. L'utilisation de l'entretien non-directif et semi-directif pourrait constituer un apport spécifiquement français au débat. L'art d'interviewer des décideurs des relations internationales pose souvent des défis particuliers qui méritent d'être enfin examinés.

#### **La sociologie des relations internationales**

Les chercheurs en France se rejoignent souvent sur l'idée que la sous-discipline peut être irriguée par des concepts sociologiques de la science politique générale. Il conviendrait d'organiser une discussion autour du questionnement suivant : en quoi les concepts tels que la domination, l'anomie, la violence symbolique ou la reconnaissance, peuvent être transposés à l'étude des relations internationales et sous quelles conditions ? En outre, comment « opérationnaliser » ces concepts pour l'étude des relations internationales ?

## **2.2 LA POLITIQUE COMPARÉE**

La plasticité de l'expression « politique comparée » complique la tâche de circonscrire le périmètre des laboratoires et chercheurs concernés. L'appellation concerne les travaux de chercheurs ou de groupes de recherches dans des centres qui n'affichent pas nécessairement une spécialisation dans les politiques comparées, quelques laboratoires faisant cependant exception.

L'analyse des sociétés extra-européennes est importante d'une part en termes de production de connaissances, car elle permet de mieux comprendre les contextes étrangers et, réflexivement, notre propre société (par exemple en comparant les dispositifs de contrôle dans des régimes dits « démocratiques » ou « autoritaires ») ; d'autre part en termes de diffusion du savoir car elle est valorisée par une forte demande de connaissances, d'analyse de conjoncture et d'expertise. Les travaux sont non seulement publiés dans les revues spécialisées (*Critique internationale*, *Cultures et conflits*, *Politique africaine*, *Revue d'études comparatives Est-Ouest*, *Revue internationale de politique comparée...*), mais aussi dans les revues généralistes centrales de la science politique. En outre, de nombreux ouvrages collectifs récents présentent l'état des recherches en politique comparée sur des questions transversales (les régimes politiques, les conflits et les situations de post-conflit, l'État) ou sur des aires géographiques (Afrique, monde arabe).

L'analyse des sociétés extra-européennes, qui est comparative dès lors qu'elle s'appuie sur des outils d'analyse forgés dans des contextes occidentaux, continue d'attirer un nombre important de doctorants. Ces thèses permettent de combler des lacunes concernant la connaissance des sociétés africaines, asiatiques, est-européennes, latino-américaines ou arabomusulmanes. Mais l'écart entre le nombre de doctorats et les postes disponibles est criant. Les débouchés sont rares car très peu de postes sont profilés pour attirer des spécialistes de ces zones ou de politique comparée. Les

manques les plus prononcés portent sur l'Amérique du Nord et l'Afrique subsaharienne.

Ces travaux n'épuisent pas le débat sur la définition de la politique comparée, en tant que sous-discipline. S'agit-il de mesurer des écarts de performance ou de saisir une proximité relative avec des idéaux-types? La question des méthodes est également cruciale. S'agit-il d'évaluer les pays sur la base d'indicateurs quantifiés supposés commensurables ou, au contraire, de soumettre des interrogations communes à l'observation de contextes socio-historiques particuliers? Enfin, quelles sont les échelles pertinentes de la comparaison : faut-il mener l'observation au niveau national, régional ou local?

Deux approches se revendiquant de la politique comparée semblent aujourd'hui se distinguer au sein de la communauté scientifique française.

La comparaison des politiques publiques ou des institutions politiques est bien développée. Elle vise souvent à comparer terme à terme des performances gouvernementales ou des données liées à un phénomène social particulier. Sans toujours adhérer à une vision évaluative et prescriptive de cet exercice, la comparaison de l'action publique s'avère nécessaire pour comprendre la trajectoire des normes internationales, une fois adoptées à un niveau global et réinterprétées par les acteurs qui les mettent en œuvre au niveau national. S'observe ainsi l'imbrication de dynamiques politiques universelles et de leurs traductions dans des contextes historiques particuliers. L'analyse de la mise en œuvre des normes internationales met aussi en lumière la diffusion des pratiques par des acteurs transnationaux, qui ne s'inscrivent pas nécessairement dans une action intergouvernementale.

Une autre forme de « politique comparée » consiste à comparer des contextes politiques. Cette comparaison thématique inter-régionale, fondée sur une connaissance fine des contextes étudiés, de leur histoire et de leur(s) langue(s), s'appuie fréquemment sur des travaux collectifs, rassemblant des spécialistes de diverses aires politiques. Il s'agit alors de tester la

pertinence d'un concept, en le confrontant à des contextes socio-historiques divers, mais caractérisés *a priori* par une certaine proximité. Une telle approche est exigeante au sens où elle demande une double compétence, en termes de connaissance du contexte étudié et des problématiques générales de sciences sociales permettant de dialoguer avec des spécialistes d'autres zones, y compris des pays occidentaux. Ces travaux sociologiques portent par exemple sur le changement de régimes politiques (au-delà des idéaux types qui fondent l'analyse des « transitions démocratiques »), la violence, les conflits et les situations de post-conflit, les trajectoires historiques des États, les mobilisations collectives (identitaires, socio-économiques, etc.) et les modes de contestation, le personnel politique et la professionnalisation dans ce domaine, les modes d'exercice du pouvoir et de légitimation, enfin la participation et le lien politiques.

## 2.3 LES ÉTUDES EUROPÉENNES

Malgré une prise de conscience de la faiblesse des recherches françaises sur l'Union européenne qui date de la fin des années 1990, celles-ci restent bien moins développées en France qu'en Allemagne, au Royaume-Uni, dans les pays scandinaves ou aux États-Unis. Ce déficit est particulièrement sensible parmi les chercheurs CNRS : rares sont ceux qui se définissent comme des spécialistes de l'Union. À l'échelle internationale, les études européennes sont pourtant reconnues comme une sous-discipline à part entière, avec ses départements, centres de recherches, associations professionnelles, revues et collections ; jusqu'à l'excès parfois, nombre de recherches dans le domaine étant fortement autoréférentielles et peu connectées aux débats qui animent le reste des sciences sociales.

Depuis quinze ans, les études européennes sont montées en puissance en France. Elles disposent aujourd'hui de leur revue, de leur organisation professionnelle au sein de l'AFSP, de plusieurs manuels et ouvrages de

synthèse de qualité. En raison de leur faiblesse initiale, elles ont conservé cependant une grande ouverture vis-à-vis des autres branches des sciences sociales. Cette spécificité tend d'ailleurs à être reconnue comme une force à l'échelle internationale. Il convient que le CNRS encourage plus spécifiquement les recherches dans le domaine des études européennes. On y reviendra.

### 3 – SOCIOLOGIE DU TRAVAIL ET SOCIOLOGIE DES ORGANISATIONS ET ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES

La sociologie du travail et la sociologie des organisations sont des domaines de recherche bien constitués et très dynamiques. Elles connaissent l'une et l'autre des évolutions de leurs frontières, objets et questionnements qui leur permettent de se développer, mais aussi de se renouveler. Ce développement parallèle, mais aussi les liens étroits qui lient leurs problématiques, nous ont conduits à ne pas les distinguer (comment penser l'un sans l'autre?). Le développement et le renouvellement remarquable des recherches sur les activités et les formes économiques et leurs apports importants à l'étude et à la compréhension des transformations du travail, des trajectoires professionnelles, des formes d'emploi, des modes d'organisation et de spatialisation du travail, nous semblent par ailleurs l'une des caractéristiques fondamentales des évolutions récentes.

Avant de revenir sur ces questions nouvelles – posées ou encore à poser –, nous présenterons rapidement le positionnement institutionnel du champ que couvre la Section 40, et ses développements récents.

### 3.1 UN POSITIONNEMENT INSTITUTIONNEL CONTRASTÉ

Malgré les interdépendances et imbrications mentionnées plus haut, les positionnements institutionnels restent assez spécifiques. Ainsi, la sociologie du travail est bien implantée au niveau institutionnel. On le voit à travers sa présence marquée au sein de l'Association Française de Sociologie, les Journées de Sociologie du travail qui se tiennent tous les ans et la vitalité de la revue *Sociologie du travail* qui vient de fêter ses cinquante ans et qui, par ses dossiers-débats et symposiums, joue un rôle d'animation important. Elle participe aussi à la diffusion de la connaissance des travaux francophones au-delà de cette communauté en publiant chaque année cinq articles en anglais dans *Sociologie du travail in English*. Toutefois, il est important de signaler que cette revue publie aussi des articles généralistes tandis que l'on trouve des articles relevant de la sociologie du travail dans de nombreuses autres revues de sociologie et notamment la *Revue française de sociologie*, *Sociétés contemporaines*, etc.

Le positionnement institutionnel de la sociologie des organisations est différent. Plusieurs réseaux de l'Association Française de Sociologie s'y rapportent, mais elle n'est pas portée par une association professionnelle particulière et ne dispose pas d'une revue spécialisée sur cette thématique. Cela tient d'une part à ce que la théorie des organisations est devenue une composante classique de la formation des grandes écoles de gestion françaises et étrangères, mais est beaucoup moins présente dans les formations universitaires. Ce sont par conséquent des revues internationales comme *Organization Science* ou *Organizations Studies* qui sont devenues des publications de référence pour les spécialistes des organisations, souvent au détriment de la composante sociologique et au profit de la composante gestionnaire. Ceci explique peut-être la tradition plus marquée et plus ancienne d'une inscription internationale de la sociologie des organisations françaises.

Depuis quelques années, la sociologie économique s'est constituée comme un champ distinct qui ne recoupe qu'en partie la sociologie du travail et des organisations. La naissance récente de la *Revue française de socio-économie* est certainement le meilleur signe de la vitalité de cette thématique et de son institutionnalisation dans le champ sociologique français.

### 3.2 DES QUESTIONNEMENTS RENOUELÉS

Même si l'on peut identifier des communautés distinctes, structurées autour de revues et d'équipes spécifiques, on observe de nombreux rapprochements entre les questionnements qui les animent.

#### Les nouvelles formes d'activités, marchandes et non-marchandes

Tout en continuant à s'intéresser au travail salarié dans des organisations présentant les traits des bureaucraties wébériennes et sur des secteurs d'activité industrielle, les recherches ont de plus en plus porté sur de nouvelles formes d'activités, qu'elles soient marchandes ou non-marchandes.

Ainsi les recherches sur les métiers et activités liés aux services et sur les entreprises de services se sont multipliées, conduisant parfois à une certaine saturation sur certains thèmes (les *call centers* par exemple) ou secteur (La Poste). Par ailleurs, ce sont surtout les personnels en bas de l'échelle hiérarchique qui ont été étudiés. Tandis qu'il conviendrait de continuer à explorer les transformations des emplois subalternes en les centrant sur des métiers encore peu étudiés (notamment ceux de l'alimentation, de la restauration et ceux du secteur de l'artisanat et du commerce), il faudrait donc simultanément engager des travaux sur les catégories intermédiaires et sur les personnels d'encadrement, confrontés dans le privé

comme dans le public à la mise en œuvre des nouveaux modes de management – que nous évoquerons plus loin.

On observe également un investissement sur les activités bénévoles et militantes et sur les organisations qui les abritent : associations, ONG, etc. Ce qui conduit inévitablement à repenser la séparation entre travail et non-travail, entre professionnels et amateurs, entre salariés et volontaires, etc. Cette réflexion a été enrichie par les recherches sur les communautés de créateurs de logiciels libres, qui sont précisément à la frontière entre le travail et le bénévolat, le marchand et le non-marchand. Plus généralement, cela a permis de déconstruire l'idée d'une naturalisation de l'économie de marché.

Des activités souvent étudiées sous l'angle de la capacité de ceux qui les développent à se constituer en groupes professionnels ont par ailleurs été abordées à travers le contenu du travail. Des réflexions autour du travail artistique, du travail créatif, ou du travail d'innovation et de recherche, ont permis de poser des questions jusqu'ici trop rarement posées, comme celle de la division du travail entre des pairs, ou la place de l'organisation par projets dans ces secteurs d'activité.

Enfin, une attention particulière a été portée aux activités qui organisent le marché, qu'il s'agisse des opérations de définition de la valeur, de celles de maîtrise de l'incertitude sur la qualité, de mise en équivalence entre un bien et un prix... Les recherches sur ces activités (qualifiées par leurs auteurs de « travail marchand ») se sont par ailleurs élargies à ceux qui l'exercent, c'est-à-dire aux intermédiaires du marché. C'est donc à la fois le travail marchand et ce qu'il a de spécifique par rapport à d'autres activités qui sont au cœur des travaux qui ont porté sur le packaging, les supermarchés, les filières de la distribution, etc.

Ces différents élargissements ont suscité l'émergence de deux nouveaux questionnements. Tout d'abord, cette ouverture à toutes les activités et tous les métiers, quelle que soit leur place dans la hiérarchie des qualifications ou dans la hiérarchie sociale a conduit à renou-

veler la réflexion sur les professionnels. Il s'agit aujourd'hui moins de s'intéresser à la constitution ou non de professions qu'à ce qui fait le professionnalisme et aux régulations endogènes à un groupe professionnel. Un dialogue fécond doit être poursuivi sur la tension entre organisation et profession. La « mise en organisation » des professions traditionnelles (juristes, avocats, universitaires etc.) et la constitution de certains services publics en « organisations » (plus d'identité, plus de hiérarchie et plus de rationalité) ont conduit de nombreux travaux à s'interroger sur la reprise en main du pouvoir professionnel par les logiques organisationnelles (notamment managériales). D'autres constatent cependant que cette recomposition des relations entre organisations et groupes professionnels passe par une redéfinition des rapports de force au sein des groupes professionnels, à l'émergence de nouvelles élites en leur sein.

Ensuite, la question de la frontière entre travail créatif et travail « ordinaire » a été soulevée, certains voyant dans les évolutions contemporaines du travail le ferment d'un rapprochement, tant dans leur contenu que dans leur structuration, entre des activités traditionnellement opposées. Il s'agit alors de s'interroger sur le glissement du travail salarié vers le travail créatif à la faveur du passage d'une organisation du travail hiérarchique à une organisation du travail par projet. Mais il s'agit aussi réciproquement de s'interroger sur les formes de rationalisation, voire d'industrialisation, qui percent derrière les transformations des activités artistiques ou scientifiques.

### **Transformations des marchés du travail, inégalités et discriminations**

Ces transformations qui touchent à la nature au contenu et à l'organisation des activités vont de pair avec une transformation assez radicale des marchés du travail. On note en particulier l'intérêt qu'il y a à revenir sur les théories de la segmentation des marchés du travail, *via* la question des discriminations. Avec la flexibilité et l'instabilité du travail dans

un contexte de capitalisme globalisé, plusieurs travaux ont montré comment se développent des systèmes d'emploi qui renforcent les inégalités sociales, de genre, ethniques.

Les marchés du travail secondaires semblent être traversés par de très fortes inégalités entre ceux dont la compétence et la créativité sont reconnues et ceux qui y sont confinés et perdent les protections traditionnelles liées au salariat. On assiste en effet à un développement remarquable du travail précaire. Ainsi, les moins qualifiés sont régulièrement et durablement relégués dans des emplois disqualifiants et disqualifiés, et la segmentation ethnique et sociale s'accroît. Ceux qui occupent un emploi précaire s'inscrivent dans des trajectoires longues, et non plus temporaires, et développent pour certains d'entre eux des carrières précaires. Celles-ci sont rendues possibles par la diversification des formes du travail précaire et des statuts d'emploi (temps partiels imposés, horaires flexibles et coupés, stages, CDD, emploi atypique ou contrats aidés soustraits, travail indépendant...) et par la hiérarchisation qui s'établit entre elles. Ces activités précaires constituent un mode spécifique de gestion du travail et des emplois mais alimentent également la constitution d'un nouveau secteur qui tend à accroître son offre en proposant de prendre en charge une part non négligeable des activités que les entreprises cherchent à externaliser (gestion du personnel par exemple). Ainsi, le travail précaire et le développement des activités intérimaires doivent-ils être aussi lus à la lueur de l'externalisation croissante des fonctions support et plus largement de la restructuration des firmes.

Il n'est alors pas surprenant que la question de la discrimination au travail et des inégalités notamment en termes de genre, tiennent aussi une place de plus en plus importante dans les travaux actuels. Le genre est de plus en plus souvent intégré comme une des dimensions de travaux qui ne se réclament pas spécifiquement des études du genre.

Les interrogations actuelles, inspirées des approches anglo-saxonnes en terme d'intersectionnalité, considèrent les discriminations comme le fruit d'un jeu d'interactions com-

plexes entre les rapports de classe, de genre et interethniques. Le courant de recherches autour des emplois domestiques dans une économie mondialisée, et de la division morale du travail de *care*, centre l'attention sur les rapports de pouvoir entre femmes, entre les patronnes (blanches, des classes moyennes ou aisées) et les domestiques (issues des classes populaires et des minorités ethniques). Le chantier des discriminations reste toutefois largement à explorer et les ponts entre sociologies spécialisées (genre, immigration, sexualités...) à consolider.

Enfin, il conviendrait de mieux comprendre comment les circulations migratoires participent à segmenter et recomposer les marchés du travail locaux et globaux, à construire de nouveaux territoires productifs nationaux et internationaux. Aujourd'hui se dessinent des formes migratoires complexes à partir d'espaces transnationaux et d'activités économiques plurielles qui produisent des économies globales. Ces questions de recherche sont aujourd'hui largement débattues sur plusieurs scènes internationales en sociologie économique en Europe mais aussi en Asie orientale et du Sud-Est, en Amérique latine, au Maghreb et en Afrique de l'Ouest. Les perspectives de coopération des chercheurs français avec ces pays sont à encourager vivement.

## **Transformations des firmes et du capitalisme**

L'évolution des formes institutionnelles des firmes, leurs nouveaux modes de management, leur internationalisation, leur mise en réseaux et les conséquences que cela a quant à l'identification des lieux de décisions, leur financiarisation, les transformations que connaissent la gestion des emplois et des carrières, conduisent à repenser les recherches sur les organisations contemporaines. Celles-ci restent en effet encore trop souvent infra-organisationnelles ou plus exactement ne cherchent pas encore assez à penser le lien entre ce qui se passe au niveau infra-organisationnel et les évolutions des relations entre les firmes, comme au sein des groupes.

Par ailleurs, les effets de ces évolutions sur ceux qui y travaillent sont au cœur de nombreuses recherches sur les conséquences de l'individuation du travail, de l'évaluation croissante des activités au moyen de critères abstraits et quantitatifs, et des nouvelles formes d'intégration (plus horizontales que verticales) qui se mettent en place. Il s'agit aussi d'étudier les formes de résistance, si ce n'est de conflits, qui naissent des restructurations et des délocalisations, et qui se développent souvent aux marges des relations professionnelles institutionnelles.

Plus largement, c'est le rapport entre les entreprises et la société qui est remis en question et redéfini. Les travaux sur le développement durable, la consommation engagée, les mouvements écologistes, s'inscrivent en particulier dans cette veine, quand ils essaient de comprendre comment ces mouvements pèsent sur les entreprises, les contraignant à développer elles-mêmes des normes, des labels ou des chartes qu'elles s'engagent à respecter, et comment ces dispositifs deviennent des réglementations publiques que l'État aura la responsabilité de faire respecter.

## **Des interactions à renforcer avec d'autres disciplines**

Même s'il existe des exceptions notables, le dialogue entre le droit et la sociologie du travail et des organisations mériterait d'être développé et renouvelé. La diversité des formes de travail et de statuts d'emploi que nous avons évoquée plus haut plaide en ce sens. Mais on peut aussi penser aux nouvelles formes qu'adoptent les firmes et les groupes : structuration en réseau, délocalisation des activités et internationalisation des implantations transforment l'exercice du droit national, stimulent la production de normes et standards transnationaux qui n'ont pas toujours de fondements légaux mais structurent les relations inter-firmes, la régulation des marchés du travail, les accords professionnels etc.

Une évolution identique serait souhaitée entre sociologie et histoire. Malgré l'existence

d'une histoire économique et d'une histoire des entreprises dynamiques, les recherches qui associent historiens et sociologues autour de questionnements sur le travail, les marchés du travail, les formes économiques, les groupes professionnels etc. sont encore trop rares.

Enfin, les rapprochements et enrichissements croisés qui ont commencé à émerger entre sociologie économique et anthropologie pour rendre compte de la pluralité des échanges économiques, devraient être poursuivis.

## 4 – QUESTIONS TRANSVERSALES

### 4.1 MÉTHODOLOGIE

La professionnalisation des disciplines de la Section 40 s'est accompagnée d'une diversification des méthodes employées. Une voie prometteuse de renouvellement de la méthodologie de nos disciplines s'affirme ainsi avec l'intégration croissante d'éléments de quantification au sein de protocoles d'enquête diversifiés. Beaucoup des programmes de recherches soumis dans le cadre du concours de recrutement des CR proposent des protocoles de ce type, articulant de manière originale quantitatif et qualitatif. La section entend encourager le développement de tels protocoles intégrés, et, avec lui, la discussion des apports et des limites des différents outils, non tant par le « coloriage » de postes ouverts au recrutement, que par une attention renforcée, lors des procédures de recrutement, à la richesse et au caractère innovant des dispositifs méthodologiques dans les projets de recherche. L'un des enjeux scientifiques de la période apparaît ainsi de favoriser la réflexion épistémologique sur les méthodes, et de stimuler l'innovation méthodologique.

Sans doute, les carences, maintes fois relevées dans les rapports passés, en matière d'étu-

des quantitatives ne sont pas encore comblées. Les raisons de ces carences sont diverses et pérennes : manque de ressources financières, insuffisance de la formation aux techniques quantitatives, etc. De manière significative, le coloriage du poste proposé au concours en 2010 n'a pas attiré un grand nombre de spécialistes des méthodologies quantitatives. Des signes encourageants d'une amélioration de la situation sont toutefois visibles, avec la création de bases de données originales – en particulier prosopographiques –, le recours plus fréquent à de grandes enquêtes (comme celle sur les pratiques de recrutement dans les entreprises), et l'émergence d'analyses de réseaux. Au-delà de la nécessaire valorisation des compétences des ITA dans les unités de recherche, la priorité demeure cependant de mieux former les étudiants et les chercheurs aux techniques quantitatives, mais aussi aux modélisations statistiques innovantes (analyses de régression, analyses factorielles, modèles log-linéaires et logistiques, statistiques des réseaux et théorie des graphes, etc.). À cet égard, le développement observable de telles formations doit être encouragé, tant au sein des formations de 3<sup>e</sup> cycle universitaires que dans les écoles doctorales.

Les approches qualitatives doivent être également et symétriquement encouragées. Les recherches actuelles, qui dans leur majorité utilisent des méthodes qualitatives, croisent souvent l'exploitation de matériaux d'archives avec l'entretien et l'observation. Concernant les entretiens, une mise en garde s'impose contre un relâchement de la vigilance épistémologique à l'endroit de ce que l'on peut en attendre et des formes de leur administration. S'il convient à nouveau de pousser à la réflexion sur l'épistémologie de l'entretien, il faut également inciter à pluraliser l'usage des méthodes qualitatives, et encourager les recherches mettant en œuvre des approches ethnographiques.

## 4.2 UN RENOUVEAU DE LA « SOCIOLOGIE GÉNÉRALE »

Nombre de programmes de recherches soumis à la section 40 ont pour caractéristique commune une capacité affichée à se saisir de façon fluide, hors des barrières disciplinaires existantes, tant des objets que des méthodes aux fins de déploiement d'une « science sociale générale ». Plusieurs dynamiques concourent à cette évolution, notamment la sociologisation constatée du traitement de problématiques relevant traditionnellement par exemple des relations internationales, des études européennes ou de la sociologie électorale, et l'historicisation, par exemple, de l'approche des institutions, des pratiques politiques, de la sociologie économique, quand il ne s'agit pas de s'inscrire directement et de façon explicite dans le cadre d'une sociohistoire.

On assiste donc, même sur un mode encore en partie programmatique, à un décloisonnement interne des différentes disciplines de la section 40, dont on peut mesurer les effets à travers notamment l'affaiblissement d'une approche distincte des institutions et des mobilisations, ou encore des politiques publiques et de la sociologie des acteurs ; de la sociologie économique et de la sociologie des migrations ; de la sociologie des institutions, des élites et du droit...

Des objets qui participaient des théories et des catégories « indigènes » d'approches spécialisées se voient ainsi, en raison même de leur appropriation par des perspectives disciplinaires multiples, construits comme objets communs aux disciplines de la Section 40 (par exemple le monde associatif, les ONG, le bénévolat, les circulations internationales, les inégalités et discriminations, les professions, les mouvements sociaux, le syndicalisme, la professionnalisation...), pour se voir reformulés dans le cadre d'une sociologie générale.

Ainsi en va-t-il de l'objet « religion », incontestablement devenu transversal pour les sciences sociales, sur fond de rupture avec le paradigme évolutionniste du dépérissement

progressif de la religion. C'est dans cette perspective que l'analyse se portera tant sur les radicalismes politico-religieux que sur l'activisme confessionnel des groupes minoritaires, le phénomène sectaire ou encore sur la réactivation des débats sur la définition et les contenus de la laïcité. Semblent dès lors s'imposer des études renouvelées prenant en compte à la fois les incidences publiques de la pluralisation de l'offre croyante dans les sociétés contemporaines, les mutations des formes sociales de la religion, les grilles de lecture « théologico-politiques », la régulation publique du religieux ou l'articulation entre religion et économie.

D'autres « entrées » pourraient être documentées dans le même sens, qu'il s'agisse du territoire ou des inégalités, du genre, des professions, etc.

## 4.3 INTERNATIONALISATION

### Les sciences sociales françaises en terrain étranger

Si les sciences sociales françaises n'ont sans doute jamais délaissé les terrains étrangers, trois dynamiques apparaissent aujourd'hui à l'œuvre : un renforcement de la recherche ; une transformation des approches ; une prise en compte accrue des phénomènes « circulatoires » et transnationaux. Concernant la première, et même si l'on ne dispose pas de données exhaustives sur ce point, il semble que les travaux comparatifs et notamment les ceux portant sur plusieurs pays de l'Union européenne ont tendance à devenir plus fréquents parmi les chercheurs de la section 40. Du côté des candidatures, en 2009, 56% des candidats à un poste de chargé de recherche ont présenté un projet qui ne portait pas uniquement sur la France. Ce chiffre atteint 72% pour les candidats à un poste de directeur de recherche. C'est en particulier sur le terrain européen qu'une montée en puissance est enregistrée. Les chercheurs français ont déjà fait leurs preuves dans le domaine de l'analyse des politiques publiques de l'Union, de la

sociologie de ses élites, du fonctionnement de ses institutions, ou de la nature de ce nouvel espace politique. Il reste qu'il est nécessaire d'étudier davantage l'impact de l'intégration européenne, que ce soit sous l'angle des processus d'europeanisation des systèmes politiques nationaux (institutions, organisations de la société civile, politiques publiques...) ou sous celui de la mobilisation des acteurs locaux et nationaux à l'endroit de l'Union. Il convient également d'encourager le dialogue avec d'autres disciplines : alors que les politistes français spécialisés dans l'étude de l'Union ont fait œuvre pionnière dans le dialogue avec les anthropologues et sociologues, les contacts avec les économistes, historiens et juristes sont pour l'heure très limités.

De nombreux problèmes subsistent toutefois, qui empêchent un plein développement des recherches sur des terrains étrangers. On soulignera, en particulier, le problème du format de plus en plus contraignant des thèses, qui rend difficile des terrains étrangers longs. Il faut également mentionner la fragilisation des relais de la recherche française à l'étranger, comme le CEDEJ, le Centre Marc Bloch, et d'ailleurs plus largement l'ensemble des UMIFRE.

La deuxième dynamique renvoie à ce que l'on pourrait appeler une « normalisation » de l'analyse des aires culturelles, par laquelle les terrains étrangers ne sont plus saisis en raison même de leur extranéité, mais comme l'occasion de tester dans des contextes sociopolitiques différents des hypothèses et des concepts généraux. On assiste ainsi à un rapprochement entre sociologie politique, relations internationales, politique comparée et « politique européenne ». Ce rapprochement au plan des questions comme au plan des méthodes est facilité par des convergences « de fond » (épistémologiques, notamment) des différentes sous-disciplines ou disciplines, en partie sous l'influence de ce retour à une sociologie générale que nous avons souligné plus haut.

Une troisième dynamique à l'œuvre est marquée par la prise en compte accrue des phénomènes « circulatoires » au niveau international. En témoignent par exemple les recher-

ches ciblées sur l'évolution des stratégies internationales des groupes religieux. Il convient également de souligner le développement d'un champ de recherches qui articule migrations internationales et travail « globalisé ». En effet l'accélération des migrations internationales révèle des dynamiques de changement social, politique et économique à l'œuvre dans les sociétés contemporaines toujours plus complexes, plurielles et diversifiées. Les circulations migratoires contribuent à segmenter et recomposer les marchés du travail locaux et globaux, à construire de nouveaux territoires productifs nationaux et internationaux. Ces questions de recherche sont aujourd'hui largement débattues sur plusieurs scènes internationales. Les perspectives de coopération des chercheurs français avec ces pays sont à encourager vivement.

## **Le développement des échanges internationaux**

Les sciences sociales françaises ont longtemps cultivé un rapport ambigu à la scène scientifique internationale. Consciente de la spécificité de leurs approches, elles se sont longtemps satisfaites d'une confrontation « en interne » vis-à-vis de leurs homologues étrangers. Loin d'être imperméables à ce qui peut se faire hors de nos frontières, elles n'ont cessé depuis les années 50 d'analyser et de réfléchir aux approches et aux avancées étrangères – soit pour les adopter, soit pour les discuter et les critiquer. En revanche, ce n'est que récemment que les chercheurs français ont fait l'effort d'effectuer le mouvement inverse pour présenter à nos collègues étrangers nos approches et résultats. Une tendance forte s'exprime ainsi depuis peu à la réduction de ce qui pouvait apparaître comme une relative insularité des sciences sociales françaises. Toutes les disciplines/sous-disciplines relevant de la section 40 n'étaient au demeurant pas concernées, les relations internationales, la politique européenne étant par nature plus « internationalisées » que d'autres.

Ce sont désormais toutes nos spécialités qui se prêtent à un tel processus d'internatio-

nalisation. Il faut remarquer à cet égard l'importance croissante d'activités en langue étrangère et à l'étranger dans le planning déjà passablement éclaté des chercheurs (injonction de publier en anglais, accroissement des participations à des événements étrangers, valorisation des expériences d'expatriation... autant de recommandations qu'entérine la section). L'ouverture vers la science politique allemande ou d'Europe du nord, vers les États-Unis, marquée par une abondance croissante d'échanges, de collaborations éditoriales ou à l'occasion de recherches collectives, l'appropriation de questions élaborées par nos collègues étrangers – comme celles posées par le genre, entre beaucoup d'exemples – dénote un changement important, et doit continuer à être vivement encouragé.

L'internationalisation de nos disciplines doit cependant faire l'objet d'une vigilance particulière.

Une réflexion a été ainsi tout récemment engagée sur les formes que peut et doit prendre cette intégration plus poussée de la recherche française à l'international (lors du congrès de l'AFSP de 2009). Cette réflexion doit être poursuivie, compte tenu notamment des possibles « effets pervers » d'une telle internationalisation. Ces effets dommageables se produisent lorsque les incitations adressées aux chercheurs se font *injonctions parfois irraisonnées*. Un évaluateur peut être amené à valoriser des contacts avec l'étranger même en l'absence de tout outil – plus fiable qu'une mesure bibliométrique – d'évaluation de la qualité scientifique de ces contacts (réseaux, colloques, institutions, revues...).

En outre, l'incitation peut se faire pressante alors même que les *moyens* d'y répondre ne sont pas, ou inégalement, donnés.

– On sait par exemple qu'aucune des institutions de recherche ne développe à l'heure actuelle de véritable *politique de traduction*, à l'exception toutefois de certaines revues (la *RFS*, *Sociologie du travail* et vraisemblablement bientôt la *RFSP*, *International Political Sociology*). La carence est alors parfois corrigée à l'échelle de l'unité de recherche, d'autres fois

compensée par un recours aux financements contractuels (et dès lors régie par des conditions strictes et coûteuses de recours à des prestataires extérieurs).

– Faute de politique d'accompagnement bien pensée d'une telle internationalisation de la recherche française, les possibilités offertes aux chercheurs sont donc inégales. Outre l'accès à la traduction (en même temps qu'à la formation aux langues étrangères, d'ailleurs), on peut évoquer les difficultés de l'accès aux dispositifs d'expatriation, très variables selon les unités de recherche et les tutelles dont elles relèvent, en dépit de l'existence par exemple de relais du CNRS à l'étranger.

Il faut également se garder des effets pervers liés au caractère par trop hâtif de l'internationalisation. Le risque est en effet celui d'une dissolution de la spécificité des sciences sociales françaises, et de confondre internationalisation et alignement sur les problématiques et les méthodes anglo-saxonnes. Ainsi, si la recherche quantitative apparaît comme une voie de l'internationalisation de la science politique française, force est aussi de constater que l'inscription de la recherche française dans les grandes enquêtes empiriques internationales se paie aussi parfois d'un aplatissement des problématiques et d'une standardisation des approches, du fait d'une réduction des questionnements au plus petit commun multiple – qui se trouve être souvent être d'origine anglo-saxonne. Si le fait d'assurer une présence française dans les programmes de coopération internationale demeure d'actualité, si la création ou l'abondement de base de données reste à encourager, il convient de se garder d'une uniformisation des méthodes employées, et d'une routinisation de leurs usages. De la même manière, la capacité à dialoguer avec des chercheurs étrangers peut ainsi être valorisée même lorsqu'elle implique d'adopter un protocole méthodologique dont l'intérêt est contesté – par exemple, la méthode de comparaison quantifiée à  $n$  cas, privilégiée par la science politique états-unienne.

L'internationalisation des sciences sociales françaises ne doit pas signifier son américa-

nisation, et suppose le développement d'une capacité autonome d'initiative.

## **5 – RECHERCHE, ENSEIGNEMENT ET EXPERTISE**

Le constat peut être dressé ici d'une tension entre deux processus contradictoires. Alors que semble s'affirmer une volonté de rapprocher, sinon de fusionner, les métiers de la recherche et de l'enseignement, un écart se creuse, au plan des contenus, entre l'une et l'autre. Cet écart s'explique par le délaissement, au moins relatif, dans les domaines de recherche, de certaines questions, traditionnellement au cœur des enseignements dispensés (sociologie des comportements électoraux, analyses des institutions politiques ou même « vie politique »). Les avancées de la sociologie politique ont eu aussi pour effet d'accentuer la distance entre la recherche et ce qui est enseigné, en particulier dans les premiers et deuxième cycles de l'enseignement universitaire.

Par ailleurs les profondes transformations du système français de recherche publique, aussi bien dans son architecture institutionnelle que dans ses modes de rétribution ou

son système de pilotage font naître maintes interrogations et suscitent de réelles inquiétudes, qui vont jusqu'à porter sur l'identité professionnelle même des chercheurs et des enseignants-chercheurs.

L'incitation croissante au développement d'une recherche experte, selon une logique de projet et de contrat, justifiée par la référence à la « demande sociale », peut sembler remettre en question le principe de libre définition par les chercheurs de leurs thématiques de recherche. Cette même logique a également pour effet de soumettre la recherche à une temporalité courte, en contradiction avec les exigences du métier, que seule l'inscription dans la longue durée apparaît en mesure de satisfaire.

Cette insistance mise sur la recherche contractuelle, intervenant à côté d'autres évolutions, telle une tendance à l'individualisation des carrières et des rémunérations, constitue également un danger pour la cohésion des unités de recherche, voire pour l'avenir des laboratoires comme cadre privilégié de définition des priorités de la recherche.

Enfin, si le CNRS n'a plus vocation à l'aménagement du territoire, pour la science politique ou la sociologie du travail, comme d'ailleurs pour les autres disciplines, la polarisation territoriale, technologique et financière en cours est porteuse de menaces de dislocation ou de perte d'autonomie, sauf peut être pour quelques laboratoires de taille critique.

## ANNEXE 1

### Profils des candidats aux postes de chargés de recherche

#### Sur la base des fiches de renseignement du concours 2009

Effectif : 151 candidats

Et éléments de comparaison avec les 21 candidats au concours DR2

#### Âge

Âge (ans)	% de la population	
Moins de 27,5	6	30
27,5 < 30	24	
30 < 32,5	52	73
32,5 < 35	21	
35 < 37,5	22	31
37,5 < 40	9	
Plus de 40	14	17
Plus de 50	3	

Remarque : Cette variable est celle qui distingue le plus nettement les candidats CR1 et CR2.

#### Année de la soutenance

Nouveaux venus en %	35
N-1	20
N-2	19
N-3 à -5	18
N-6 à -10	8

Remarque : Pour les candidats DR2

Année 2000	14
1999	10
1992-1997	30
1986-1991	25
1974-1983	25

Remarque : Pour les candidats DR2, année soutenance de l'HDR

2000-2005	24
2007-2008	33
2009-2010	24
Pas d'HDR	19

#### Sexe

	Hommes	Femmes
CR	58 %	42 %
DR2	52 %	48 %

**Nationalité :** 88 % de Français (95 % pour les candidats DR2) ; 7 % Européens ; 5 % autres

#### Statut des candidats DR2

CR1	81
Chargé de mission	5
Maître de conférence	10
Professeur des Universités	5

#### Orientations de la recherche

##### Discipline de soutenance de la thèse :

Discipline	Effectifs en %		Candidats DR2
Science politique	35	66	38
Sociologie	31	43	
Histoire	9	30	14
Philosophie	5 +		
Droit	5 +		
Anthropologie	5 +		
Économie	3 (cf. coloriage)		
Travail social	1		

Discipline	Effectifs en %		Candidats DR2
Sciences de l'information et de la communication	1	5	
Autres	4	4	

**Sous-discipline principale** (à partir des titres de la thèse et du programme)

Au sens strict : un spécialiste des politiques européennes est recensé dans cette seule catégorie (au détriment de la politique comparée ou de la sociologie de l'État), par exemple.

Discipline	Sous-discipline	
Science politique	Sociologie de l'État	23
	Sociologie des citoyens	12
	Théorie politique, histoire des idées	10
	Politique européenne	8
	Relations internationales	8
	Politique comparée	7
	Communication	6
Sociologie	Sociologie du travail	11
	Sociologie des religions	6
Droit		5
Histoire		2
Démographie		2

### Autres caractéristiques

Dimension internationale : 56 % (hors France seule) (*Pour les candidats DR2, 71 %*)

Thème de la socialisation : 5 %

Thème du genre : 6 (10 % des candidats DR2)

Méthodologie quantitative : 18 (cf. coloriage – 5 % pour les candidats DR2)

Méthodologie comparée : 37

Sociologie du travail et des organisations : 16 % (*19 % des candidats DR2*)

Localisation de la recherche hors Europe de l'Ouest : 23 % (*19 % des candidats DR2*)

dont :

Monde arabe : 7 (+2 avec Iran et Turquie) (*candidats DR2 : 5*)

Afrique (hors Maghreb) : 5 (*idem candidats DR2*)

Amérique latine : 3

Europe centrale et orientale hors UE : 2

Asie et Australie : 3 (*candidats DR2 = 5*)

États-Unis : 1

Remarques

*Élément de comparaison avec les candidats DR (comparaison à manier avec précaution : les candidats au concours DR2 ont été recrutés CR, ils n'ont pas encore été recrutés DR – nous ne sommes pas parvenus à obtenir des données comparables concernant l'ensemble des chercheurs en activité, hélas) : ceux-ci sont beaucoup plus positionnés sur des thématiques internationales, mais recourent moins aux méthodologies quantitatives (ou le mettent moins en avant – rappelons le coloriage du concours CR), et localisent moins leurs recherches dans des « aires culturelles » hors Europe de l'Ouest.*

### Localisation en France

#### Lieu de soutenance thèse

Lieu	Ville ou institution	Effectif %	Total %	Candidats DR2 %
Paris et banlieue	EHESS	21	65	76
	Sciences Po	16		
	Université de Paris I	8		
	Autres	20		
Région dont	Bordeaux	5	30	14

Lieu	Ville ou institution	Effectif %	Total %	Candidats DR2 %
	Lille	4		
	Toulouse	3		
	Lyon	3		
	Grenoble	3		
Étranger			4	10

### Affectations demandées

#### Première affectation en %

Paris et banlieue	41			71 % des candidats DR2 (idem laboratoire d'appartenance)
Région	52	Lille	14	
		Lyon	8	
		Bordeaux	7	
		Aix	6	
		Amiens	6	
Aucune	7			

#### Première et deuxième affectation en %

Double demande Paris et banlieue	32
Double demande Région	29
Demande mixte	32
Aucune demande	7

#### Mouvement lieu de la thèse/première demande d'affectation en %

Pas de mouvement, Paris à Paris	30
Mouvement Paris/région (dans les deux sens)	45
Pas de mouvement, région	6
Mouvement, d'une région à une autre	12
Aucune demande d'affectation	7

### Remarques

Les candidats CR ne signalent aucun laboratoire beaucoup plus souvent que les autres. Cette donnée, ajoutée à celle concernant l'absence de demande d'affectation (7%), montre qu'une partie des candidats ne connaissent pas du tout le concours.

Élément de comparaison avec les candidats DR: Au moment du concours DR2, 2/3 des candidat(e)s ont fait l'ensemble de leur carrière ou presque à Paris (thèse, HDR, laboratoire d'appartenance, laboratoire demandé).

## ANNEXE 2

### Les IT en section 40

L'effectif des IT principalement rattachés à la section 40 (rattachement de l'unité) est l'un des plus faibles de toutes les sections du CNRS et est en constante diminution. Il est passé de 109 en 2006 à 94 en 2009 (- 14%). Cet effectif se retrouve principalement dans le corps des IE (38%), ce qui constitue une spécificité des sections SHS en général.

Leur âge moyen approche 50 ans. Avec les sections 36 et 38, il s'agit de l'un des plus élevés de l'ensemble des sections. Mais la projection dans les années à venir est particulièrement défavorable pour la section 40: 43% d'entre eux ont plus de 55 ans (ils ne sont que 36% dans ce cas dans les autres sections SHS, 21% au sein des sections non SHS, et 16% dans la section 41). C'est donc près de la moitié des effectifs qui sera amenée à partir à la retraite dans les 5 à 10 ans. Les effets de cette évolution, conjugués avec ceux d'un trop faible recrutement conduisent à une situation critique pour les unités de recherche de la section.

Les IT sont en effet répartis seulement dans 4 branches d'activité professionnelles:

– La plus importante est la BAP J (Gestion et pilotage, valorisation de la recherche et coopération internationale) avec 37 agents, 39% c'est-

à-dire une proportion bien supérieure à la moyenne des autres sections SHS (26%). Ces agents, qui se sentent fortement liés à la section 40, exercent des activités transversales d'accompagnement de la recherche : gestion administrative et financière des unités, aide à la valorisation (organisation de manifestations scientifiques, colloques, journées d'étude, etc.), coordination administrative et financière des réponses aux appels d'offres et à projets des bailleurs de fonds nationaux, européens et internationaux, aide au *fund raising*.

– Les IT sont ensuite répartis à égalité (27% dans chacune des BAP) dans les BAP D (Sciences humaines et sociales) et F (Documentation, culture, communication, édition, TICE).

La forte proportion d'IT en BAP D, le plus souvent au niveau ingénieur (traitement et analyse de bases de données), qu'ils soient IE ou IR, correspond aux métiers directement liés à la production scientifique et au traitement des sources mises à disposition des chercheurs. Pour beaucoup, ce sont des experts, analystes de données qui travaillent en interaction avec les chercheurs sur les programmes de recherche. Le non-renouvellement de ces agents aura donc nécessairement des conséquences néfastes directes sur la qualité de la recherche.

Le nombre tout aussi important d'agents de la BAP F correspond aux métiers de l'information scientifique, bibliothèques et documentation qui reste le deuxième élément essentiel sur lequel s'appuie la recherche en section 40. Le rôle de ces agents est important dans la sélection et la validation des sources. La réduction du nombre des documentalistes ayant une grande connaissance des thèmes de recherche menace là les bibliothèques d'UMR, fonds spécialisés uniques,

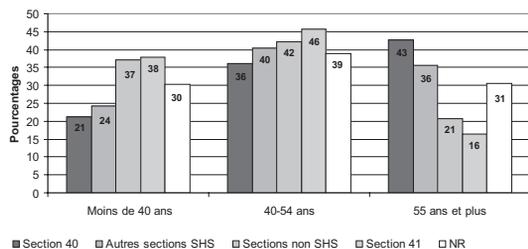
reflétant parfois toute la mémoire d'une discipline ou d'une thématique. C'est également l'abandon d'un type de collaboration original, proche du processus de recherche, qui ne se retrouve pas dans les services communs de documentation des universités. Le développement des ressources en ligne nécessiterait au contraire une augmentation des effectifs (aide à l'édition numérique, gestion des données numériques, participation aux archives ouvertes, référencement, diffusion des informations).

– La BAP E (Informatique, statistique, calcul scientifique) concerne seulement 7% de l'effectif.

Toutes ces activités font partie intrinsèque de la recherche et peuvent difficilement s'externaliser sans une perte de sa qualité. L'augmentation de la professionnalisation et de la spécialisation des agents s'accommode mal de recrutements à des indices plus faibles lorsque les postes sont remplacés. Par ailleurs, il s'agit là d'un effectif IE et IR important qui est amené à contribuer directement à la production par des écrits reconnus par la communauté (mais non évalués). Enfin, face à un financement de la recherche obéissant à une logique de plus en plus concurrentielle, la mutualisation des activités professionnelles transversales d'accompagnement de la recherche (BAP J) ne peut que partiellement résoudre les problèmes liés au non-renouvellement des agents si l'on veut maintenir le volume d'activité et la réactivité des unités. La situation actuelle voit converger le tarissement des recrutements avec des départs à la retraite massifs des IT. Elle peut amener à la déstabilisation de certaines équipes. En l'absence de recrutements, les chercheurs risquent de devoir à terme assumer seuls les travaux d'administration, d'information scientifique et d'analyse des données.

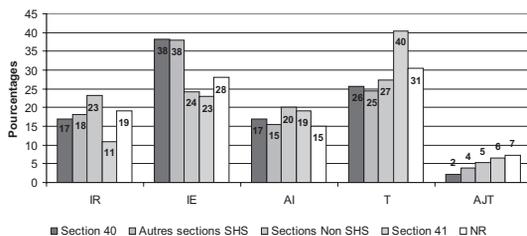
### Statistiques relatives au personnel IT de la section 40 (1)

**Graphique 1 – La distribution des âges IT CNRS en fonction des grandes sections CNRS**



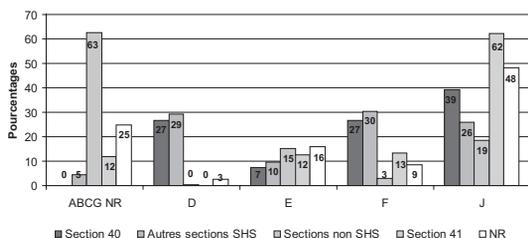
→ NL : 21 % des IT de la section 40 ont moins de 40 ans, 24 % pour les autres sections SHS

**Graphique 2 – La distribution des corps IT CNRS en fonction des grandes sections CNRS**



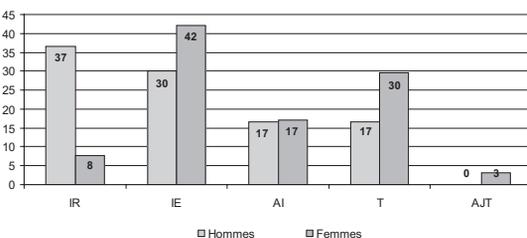
→ NL : 17 % des IT CNRS de la section 40 sont IR, 18 % pour les autres sections SHS.

**Graphique 3 – La distribution des BAP IT CNRS en fonction des grandes sections CNRS**



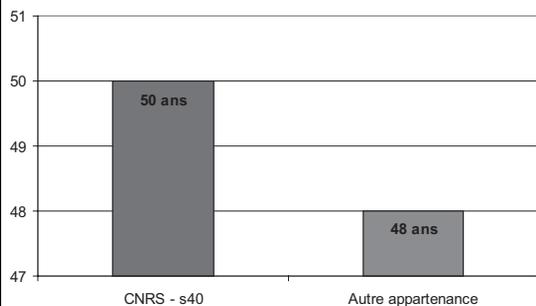
→ NL : 27 % des IT CNRS de la section 40 sont en BAP D, 29 % pour les autres sections SHS<sup>1</sup>

**Graphique 4 – La distribution des corps IT CNRS en fonction du sexe, section 40**

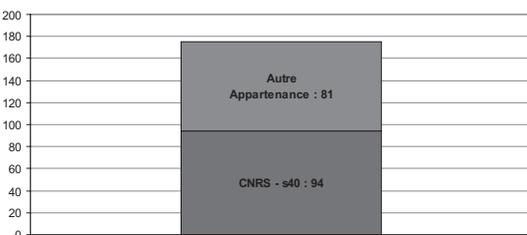


→ NL : En section 40, 37 % des hommes (IT CNRS) sont IR, 8 % des femmes sont IR.

**Graphique 5 – L'âge moyen du personnel IT en fonction de l'appartenance (section 40)**

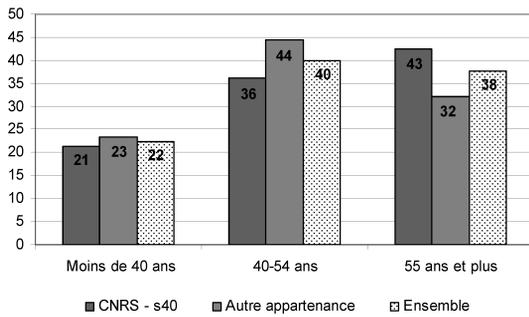


**Graphique 6 – Les effectifs du personnel IT en fonction de l'appartenance (section 40)**

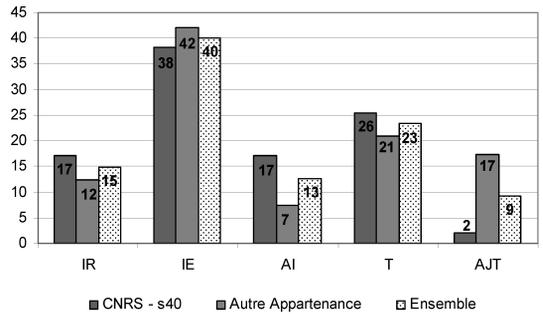


1. Aucun traitement de vérification ou de validation sur l'infotype BAPAGENT n'a été effectué à ce jour (Bilan social en cours de réalisation). Donc, ces données sont à titre indicatif (données brutes du Système d'information SIRHUS).

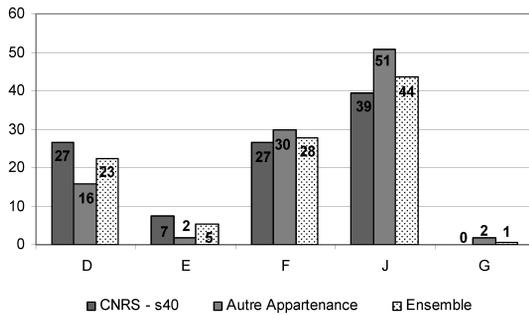
**Graphique 7 – Les distribution par âge du personnel IT en fonction de l'appartenance (section 40)**



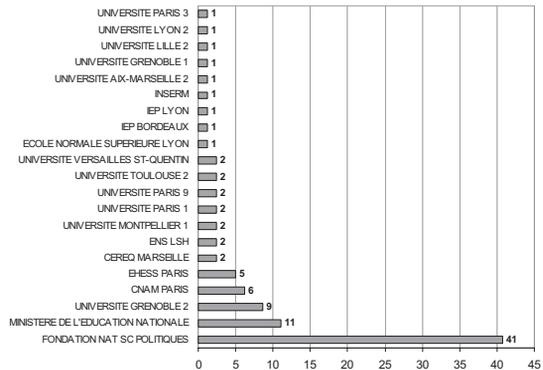
**Graphique 8 – Les distribution par corps du personnel IT en fonction de l'appartenance (section 40)**



**Graphique 9 – Les distribution par BAP du personnel IT en fonction de l'appartenance (section 40)**



**Graphique 10 – L'organisme d'appartenance des IT Non CNRS en % (section 40)**



*IT CNRS : Aucun traitement de vérification ou de validation sur l'infotype BAPAGENT n'a été effectué à ce jour (Bilan social en cours de réalisation). Donc, ces données sont à titre indicatif (données brutes du Système d'information SIRHUS).*

**Note**

(1) Sources IT CNRS : Observatoire des métiers, statistiques au 31/12/2009 (Bilan social 2009, en cours de réalisation). Sources IT non CNRS : CNRS, Délégation Paris A.



RAPPORTS

DES QUATRE COMMISSIONS INTERDISCIPLINAIRES



## SCIENCES DE LA COMMUNICATION

*Président*

Pascal GRISET

*Membres de la section*

Gérard ARNOLD

Nathalie AUSSENAC-GILLES

Nicolas BALACHEFF

Rita-Danielle BRESEGHELLO

Stéphane DOUADY

Laurence GALLITRE

Michel GROSSETTI

Didier LE RAY

Jane LECOMTE

Sylvie LELEU-MERVIEL

Isabelle LUCIANI

Cécile MEADEL

Serge MIGUET

### INTRODUCTION

La Commission Interdisciplinaire « Sciences de la Communication » siège depuis deux ans. Elle a eu à se prononcer sur deux concours de recrutement et c'est à partir de cette expérience que ce rapport de conjoncture est réalisé.

Le recul est donc faible pour délivrer un document ayant valeur de référence. Cet objectif étant en l'état inatteignable il s'agira ici de souligner les lignes forces d'une réflexion portant sur le champ des « Sciences de la Communication » en lien avec le fonctionnement de la CID et d'en dégager quelques orientations susceptibles de projeter dans l'avenir la recherche en sciences de la communication au CNRS.

Rappelons que la mission de la CID 42 inclut les thèmes couverts par la section 71 du CNU en les dépassant très largement. Sa mission a jusqu'à présent concerné des postes articulés aux thématiques de l'Institut des Sciences de la Communication du CNRS. Les « mots clés » définissant le champ de la CID tels qu'ils sont arrêtés par les documents la présentant sont ainsi très exactement calqués sur les cinq axes de recherche de l'ISCC. Ces mots clés sont :

- Langage et communication : représentation, sciences cognitives, modélisation, traduction, éducation

- Communication politique, espace public et société : espace public, récepteur et publics, médias et nouvelles technologies, organisations et Communication de crise

– Mondialisation et diversité culturelle : mobilités, identités, industries culturelles et de la communication, conflits dans la mondialisation

– Information scientifique et technique : partage des savoirs, normes et traçabilité, indicateurs, terminologies, industries de la connaissance, controverses et théories de la connaissance

– Sciences, technologies et sociétés : expertises et évaluation, régulation et innovation, statut et responsabilité des communautés scientifiques, acceptabilité des technologies

En prenant en compte le spectre très large, qu'il serait illusoire de tenter d'aborder dans un document de synthèse lié à nos activités, c'est donc plus raisonnablement à partir de son expérience, liée aux profils des postes proposés au concours et aux dossiers de candidature déposés que la CID propose ce rapport qui, tout en recouvrant une part significative de ces thématiques, ne peut les inclure toutes.

## CONTEXTE

À partir des premières années du XIX<sup>e</sup> siècle, les technologies liées à l'information, à son enregistrement, son transport et son traitement, sont nées selon des trajectoires autonomes. Elles se sont ensuite développées de manière conjointe puis se sont rapprochées dans le cadre de la numérisation de l'information. Ce que l'on a dénommé la « Convergence » a vu se regrouper, télécommunications, audiovisuel et informatique pour proposer des objets, des réseaux et des dispositifs complexes inclus depuis le dernier quart du XX<sup>e</sup> siècle dans le champ très large des « technologies de l'information et de la communication » (TIC). Trois grandes étapes historiques correspondant à trois grands systèmes techniques : l'électricité, l'électronique des tubes à vide et l'électronique des semi-conducteurs ont scandé cette croissance. Nous nous situons

dans la troisième de ces phases. Celle-ci peut être considérée à travers trois prismes principaux.

À la charnière des XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles, la prégnance de ces technologies dans l'évolution économique, sociopolitique et culturelle de nos sociétés a fait émerger l'expression de « Société de la connaissance ». Ce terme, instrumentalisé et insuffisamment historicisé souligne néanmoins le caractère incontournable d'un phénomène encore très mal connu et donc du développement de recherches le concernant.

Ces technologies se sont établies dans le cadre de synergies de plus en plus étroites avec la science. L'innovation s'est tout d'abord articulée de manière informelle au développement de la physique, quitte parfois à précéder l'extension du champ des savoirs formels.

Progressivement cependant au cours du XX<sup>e</sup> siècle les innovations relevant de l'électronique se sont inscrites dans des processus de recherche où le rôle des grands laboratoires devenait déterminant. L'invention du transistor en 1947 marque en cela un tournant.

Dimensions technologique et scientifique ne doivent cependant pas écraser la perspective.

La communication, si elle n'est pas le propre de l'homme, est néanmoins étroitement liée au développement de la civilisation. Qu'il s'agisse de mots, d'images, de signes, les vecteurs de communication sont l'objet de l'ensemble des disciplines relevant des sciences de l'homme et de la société. De la rhétorique aux « media studies », la communication est un domaine étroitement associé aux évolutions historiques de notre civilisation. Elle porte également des enjeux cruciaux, encore difficilement pris en compte, pour l'émergence d'échanges intercivilisationnels et cela à différentes échelles.

Ces trois dimensions s'apparentent à un ensemble proche du triptyque « Sciences-Technologie-Société ». Le travail de la CID 42, tel qu'il s'est mis en place au cours des deux sessions 2009 et 2010 peut s'inscrire partiellement

ment dans cette continuité. En effet, deux éléments rendent sa démarche tout à fait spécifique :

1/ La communication est son objet central. L'approche de la CID 42 englobe donc tout à la fois le champ qui était celui des programmes STS et l'ouvre à des domaines (art, culture, loisirs... parmi d'autres) et surtout à des questionnements qui, sauf de manière marginale, n'en faisaient pas partie. Il faudrait citer à titre d'exemple la mise en espace public des questions scientifiques, l'analyse des argumentations et des constructions textuelles, la production et l'appréhension des données en masse, l'ergonomie et les usages, les approches géopolitiques etc.)

2/ Son cadre d'action est lié au développement de l'Institut des Sciences de la Communication du CNRS et à l'intitulé des postes arrêté par la direction du CNRS en lien, pour ces deux sessions, avec le développement de cette structure. Son action concerne un nombre significatif de sections du Comité National couvrant un large champ scientifique.

Pour les Sciences de la Nature et les Mathématiques les sections 7 : *Sciences et technologies de l'information* (informatique, automatique, signal et communication), 8 : *Micro et nano-technologies*, (électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique, 16 *Chimie du vivant et pour le vivant* (conception et propriétés de molécules d'intérêt biologique), 17 *Système solaire et univers lointain*, 20 : *Surface continentale et interfaces*,

25 : *Physiologie moléculaire et intégrative*, 27 : *Comportement, cognition, cerveau*, 29 : *Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des macromolécules aux communautés*.

Pour les Sciences de l'Homme et de la Société les sections 33 : *Mondes modernes et contemporains*, 34 : *Langues, langage, discours*, 35 : *Philosophie, histoire de la pensée, sciences des textes, théorie et histoire des littératures et des arts*, 36 : *Sociologie – Normes et règles*, 37 : *Économie et gestion*, 38 : *Sociétés et cultures : approches comparatives*, 39 : *Espaces, territoires et sociétés* et 40 : *Politique, pouvoir, organisation*.

Sur la base d'une telle feuille de route, et en respectant le pilotage de la Direction générale déléguée aux sciences (DGDS) du CNRS sous lequel elle est placée, la CID 42, a donc arrêté un ensemble de principes de fonctionnement :

Être un lieu de convergence entre sciences formelles et sciences de l'homme et de la société dans le respect des modes d'évaluation et de valorisation spécifiques à l'ensemble des disciplines concernées.

Dans le cadre des postes tels qu'ils étaient définis, faire émerger des profils de chercheurs caractérisés par l'excellence en termes pluridisciplinaires. En lien avec le point précédant un regard tout particulièrement attentif a été porté aux projets permettant de franchir les limites coutumières entre sciences de l'homme et de la société et sciences formelles sans faire de ce point un impératif. L'interdisciplinarité est en effet, cela va de soi, interne aux sciences formelles et aux sciences de l'homme et de la société.

Après avoir bien évidemment écarté les dossiers dont le socle épistémologique spécifique à la discipline du doctorant serait trop incertain, distinguer les dossiers qui, par les travaux présentés et le projet proposé, révèlent une ouverture aux questionnements sociétaux dans le cadre d'une approche globale et actuelle de la communication.

Sur ces bases le bilan des sessions 2009 et 2010 permet de souligner des acquis particulièrement éclairants.

1. Malgré une information imparfaite de la communauté scientifique, les candidatures sur des postes aux profils souvent étroits soulignent la vigueur des interrogations portant sur la communication en lien avec les domaines évoqués.

2. L'augmentation très sensible du nombre de candidats (entre 2009 et 2010) et la qualité des projets présentés révèlent un véritable potentiel d'innovation chez de jeunes docteurs ayant pour objet de recherche la communication et pour qui l'interdisciplinarité semble d'une certaine manière indissociable de la conception de leur futur métier.

3. L'originalité et la diversité des dossiers. Se sont ainsi présentés devant la commission des candidats et candidates dont l'approche n'aurait pu satisfaire aux exigences d'une discipline tant elle requerrait des compétences situées aux marches de plusieurs domaines de connaissance. Leur projet formulait des questionnements particulièrement originaux. (trois exemples parmi d'autres : sciences des systèmes complexes, STIC et sociologie ; chimie, prospective et sciences politiques ; sciences de l'information et droit...).

Sur ces acquis, cinq grands axes de réflexion sont proposés :

### **1/ La communication au coeur du triangle STS**

Le renouvellement historiographique de l'histoire des sciences interroge, dès le siècle des Lumières, l'essor d'une science « moderne » assise sur des processus de visibilité et de validation publiques. De la place des amateurs dans la structuration spontanée d'un champ du savoir (*cf.* par exemple les travaux actuels sur la naissance de l'aéronautique ou ceux sur la constitution des savoirs profanes sur le web, par exemple dans les domaines de la médecine ou de l'environnement) aux formes de participation du citoyen dans les controverses médiatisées par internet, les modalités de la gouvernance et de ses acteurs intéressent l'ensemble des sciences humaines, dans le sillage, par exemple, de la sociologie de la mobilisation et de la sociologie historique des publics scientifiques.

Le public n'est plus seulement cette instance qui vient valider (ou invalider) les choix des politiques ou des experts, il devient partie prenante des décisions qui touchent à l'intérêt collectif ou au bien public. La gouvernance d'internet en est le cas emblématique puisqu'elle distribue l'autorité en une multitude d'instances qui modèlent des éléments du réseau (technologiques, industriels, économiques, sociaux...) avec des légitimités sans rapport avec la délégation traditionnelle qui fonde l'autorité politique en démocratie. Si les juristes ou les économistes ont largement contribué à ces réflexions, vient aujourd'hui le temps des

politistes, sociologues ou historiens, qui se penchent sur la manière dont se construisent les normes (localement ou globalement), et sur leur implémentation dans une étroite interaction entre architectures techniques, usages ou pratiques et principes de gouvernance.

Des possibilités critiques démultipliées qu'offrent les technologies de communication, on en vient à la circulation des controverses, ces disputes où les savoirs sont incertains et l'expertise interrogée. L'histoire des controverses, déjà ancienne, interroge toujours les questions de compétence et d'autonomie des savoirs ; l'étude des controverses est ainsi devenue une « méthode d'analyse » en histoire ou en sociologie des sciences, liée nécessairement au politique puisque les divergences se formulent dans l'espace public. Avec la démultiplication des espaces électroniques de débat, reste désormais à interroger leur médiatisation, c'est-à-dire les procès de transformations et de reconfigurations de la controverse lorsqu'elle est discutée dans des espaces de diffusion non spécialisés, destinés à un public qui n'est pas a priori estimé expert du domaine.

À présent, comme le montre l'étude des controverses, un des plus importants défis pour la science en général, et donc un des sujets de prédilection des recherches en STS, est la compréhension des mécanismes d'intervention de l'expertise dans la vie socio-économique et politique. En effet, l'expertise, placée à la frontière entre la recherche et sa transcription en réalité vécue, transforme des traits et configurations des connaissances scientifiques en effets sur le quotidien de nos concitoyens.

Aussi, est-elle aujourd'hui interrogée et ses résolutions ne sont plus considérées comme acquises. Par sa fonction d'aide à la décision, l'expertise contribue à l'arbitrage entre des intérêts contradictoires, quand elle même se révèle de plus en plus souvent partagée, divisée.

Frontière, débat et espace de négociation, l'expertise est donc par nature terrain de communication où se croisent des enjeux d'arbitrages impliquant directement les scientifiques et donc leurs institutions. Cruciale de manière

large pour la société une connaissance réelle de ces phénomènes fondée sur une recherche ambitieuse l'est donc également très spécifiquement pour le bon fonctionnement et donc l'avenir des institutions de recherche elles-mêmes. Plusieurs entrées peuvent être soulignées, sans épuiser le champ :

– Les procédures de fonctionnement des comités d'experts (critères de choix des membres, règles de fonctionnement, formes de conflit entre les experts *et* « statut » des « divergences entre les experts », modes de collaboration et travail collectif...)

– L'articulation entre le principe de « transparence » et l'indépendance des chercheurs mobilisés pour l'expertise nécessite des approches renouvelées et amples liées à une véritable compréhension des pratiques de communication des résultats de l'expertise. Il est également nécessaire d'analyser les formes possibles de protection réglementaire ou institutionnelle de l'indépendance du chercheur en situation d'expertise.

– Face à la diversité de situations d'expertise, scientifique, administrative, juridique, etc., les éléments de convergence, et de divergence, entre ces diverses situations sont mal connus tout comme le statut de l'expert (privé ou public par ex) en relation avec son terrain mériterait des approches systématiques.

– Prise en compte de l'expertise dans l'évaluation du chercheur et symétriquement évaluation de l'expertise. Des outils spécifiques doivent être élaborés pour prendre en compte cette réalité duale.

## 2/ Communication et espace public

Ces dernières années correspondent à un renouvellement des études relatives à l'espace public dans tous les domaines des SHS, notamment en histoire, sociologie, linguistique et sciences politiques. Dans ces domaines, où les paradigmes habermassiens sont mobilisés depuis les années 1990, les investigations sur les catégories du *public* ont donné lieu à de nouvelles mises à l'épreuve. Elles ont intéressé le très contemporain, sur la communication politique, comme par exemple les interroga-

tions sur la mesure et l'effective visibilité d'une opinion publique ou les travaux sociologiques sur l'expérience collective que constitue l'appartenance à un public (qu'ils s'agissent du spectacle vivant ou des médias électroniques). Elles se sont également penchées sur les constructions généalogiques les plus reculées, revendiquant jusqu'à l'anachronisme heuristique des catégories qu'elles mobilisent : il en va ainsi de la généalogie de l'espace public dans le cycle d'enquête sur « l'espace public au Moyen Âge » (LAMOP) ou encore de la redéfinition du public et des lieux publics (de l'agora aux salons) dans de nombreux travaux, tant en histoire littéraire qu'en histoire des sociabilités... Ces investigations ont suscité plusieurs pistes, parmi lesquelles certaines émergent comme des centres d'intérêt à la fois transhistoriques et fortement interdisciplinaires.

– De nombreuses interrogations portent actuellement sur la redéfinition des liens qui existent entre l'espace public, la communication politique et la démocratie.

Ces travaux s'attachent à la dimension argumentative de la notion de *public* (*espace public, opinion publique, divers lieux publics...*), comme à sa dimension linguistique, dans la lignée, par exemple, des travaux de Keith Baker, instituant l'opinion publique en source d'autorité dans le discours politique. Cette dimension argumentative de la notion d'espace public est interrogée par les historiens (par exemple à travers le *topos* de la décadence de l'agora puis du forum) comme par les sociologues ou les sémiologues.

Ce questionnement intéresse, à travers la rationalité ou l'illusion de l'« opinion publique », l'exercice de la démocratie, interrogation forte en droit et en sciences politiques, autour par exemple du rôle des sondages d'opinion, mais qui intéresse également les historiens de la « société civile » (par exemple, récemment, l'histoire des transitions démocratiques qui interroge l'essor du processus démocratique d'appropriation, par une société civile, d'une capacité de jugement politique légitime). L'étude des conditions de production de la communication politique et des conditions de possibilité des formes de la délibération (illus-

trées par exemple sur les interrogations actuelles des médiévistes sur les registres de délibération ou par les travaux sur les forums délibératifs) permet également d'envisager l'espace public comme une « potentialité du devenir politique » un processus politique dont la réversibilité rend opératoire une approche transhistorique des modes de construction de la sphère publique.

Brouillant les frontières traditionnelles qui définissent la société civile, les technologies digitales qui permettent la mise en espace public de la parole citoyenne viennent interroger les conditions même de production de « l'opinion publique ». Internet, avec ses différentes applications, met ainsi en question les figures de la démocratie en transformant les conditions de la représentativité et les modalités du débat public. La sociologie ou la science politique s'applique dès lors à en mesurer les conditions et les caractéristiques.

La rationalité de l'agir communicationnel habermassien, qui sous-tend la validité de la controverse publique, entraîne aussi l'interrogation sur le terrain d'une interaction sociale normée par des formes d'accord entre les individus, qui prennent en compte non seulement la visibilité dans l'espace public mais aussi l'invisibilité de certains groupes et individus et leur quête de reconnaissance sociale et politique. S'y ajoutent des interrogations sur le poids que font peser les infrastructures socio-techniques de communication sur les interactions et sur la manière dont elles modifient et transforment les règles du vivre ensemble.

Chacun de ces questionnements gagne à être inscrit dans l'étude des processus de communication eux-mêmes, envisagés comme processus transhistoriques également éclairés par les processus naturels auxquels s'intéressent d'autres disciplines de la CID 42. Cette inscription permettra d'interroger plus précisément la manière dont se construit un savoir concerté, qui est une des facettes légitime de l'opinion publique. Elle permettra d'interroger plus précisément aussi les spécificités historiques que possèdent des processus dont la comparaison diachronique assure une meilleure compréhension. Il en irait ainsi, par

exemple, de la « spontanéité » de savoirs et de pratiques mis en valeur chez les amateurs par l'histoire des sciences à l'époque moderne, comme de l'implication des internautes dans les savoirs et controverses soulignée par de nombreux travaux d'historiens contemporains, de sociologues et de politistes. Elle permettra d'interroger plus précisément, enfin, les « structures de communication » propres à des époques données.

### **3/ Communication, document et support numérique**

La numérisation du document dans toutes ses formes et dans différents médias (image, texte, son ou vidéo) interroge autant les sciences de l'information que l'informatique et les sciences sociales.

Le support numérique oblige les sciences de l'information à renouveler les modes de classement, d'indexation des contenus et les systèmes d'accès, à redéfinir ses outils et objets d'analyses et, avec eux, ses frontières. L'informatique mène une course effrénée pour gérer, utiliser, valoriser des collections documentaires numériques toujours plus grandes. Les sciences cognitives et plus largement les Sciences de l'Homme et de la Société sont confrontées à de nouveaux objets d'études. Les thématiques de recherche convoquent ces disciplines, et différentes facettes de l'informatique comme le traitement automatique des langues, la représentation des connaissances, l'ingénierie des connaissances et particulièrement des ontologies, mais aussi la recherche d'information, l'extraction d'information ou la gestion documentaire, et couvrent l'ensemble des facettes de la numérisation :

- La gestion de masses de données : les grands volumes informationnels, leur diversité de structuration et de fiabilité, leur redondance, sont à la fois des obstacles et des chances. La quantité d'information peut freiner un accès rapide à l'information, mais aussi motiver l'invention de nouvelles architectures informatiques (grille, nuages d'ordinateurs), de nouveaux algorithmes et leur implémentation distribuée. Elle fournit des opportunités nouvelles pour les approches statistiques de fouille

de données et de textes, la mise en correspondance de savoirs ou encore la « découverte » de connaissances.

– L'analyse et caractérisation des contenus : trois perspectives cohabitent actuellement à l'échelle d'internet, relevant de pratiques et de techniques complémentaires. Une première approche définit des analyses statistiques complexes (enrichies parfois d'analyses linguistiques minimales et robustes) des contenus informationnels mais aussi des liens entre documents, et plus récemment des traces de consultations (logs, avis de lecteurs, etc.) ; cette approche est mise en oeuvre dans les grands moteurs de recherche. Une deuxième voie, celle du web sémantique, consiste à favoriser l'analyse linguistique et sémantique des contenus pour déboucher sur des représentations sémantiques formelles, manipulables par des programmes et plus « riches » que les index classiques. Les langages du web sémantique (standards établis par le W3C comme RDF, RDFs et OWL ou Skos) sont la technologie au coeur de travaux qui requièrent des modélisations précises, des analyses linguistiques élaborées et des représentations complexes. La troisième piste renvoie aux différentes pratiques du web social ou web 2.0, et consiste à tirer profit des productions des lecteurs/utilisateurs d'information, leurs propres caractérisations de contenus, vocabulaires d'annotation, etc. L'innovation incessante du web est à la fois objet d'étude et mode de définition de nouveaux supports informationnels, de nouveaux modèles de définition et d'analyse de contenus.

– Le renouvellement et la richesse sémantique des ressources de référence : les notions de langage documentaire, thésaurus ou vocabulaires contrôlés sont bousculées et leurs frontières se recouvrent de plus en plus. Les pratiques actuelles croisent ces ressources classiques, disponibles sur support informatique ou papier, avec des classifications ou des listes formant les vocabulaires d'annotation pour le partage de documents sur le web. La notion d'ontologie vient envahir les solutions informatiques pour disposer des ressources sémantiques. Beaucoup de recherches sont encore nécessaires pour simplifier leur élaboration,

améliorer et unifier leur qualité, faciliter leur exploitation, leur réutilisation, ou encore rendre compte de leur dynamique.

– L'étude des pratiques individuelles et collectives liées à l'accès à l'information : dépôt de textes, de commentaires, d'annotations, place de cette information spontanée par rapport à la production professionnelle ; nouvelles productions rendues possibles par la numérisation (réutilisation, comparaison de textes...) et par la mise en réseau des documents (composition, partage, diffusion active...). Qui est propriétaire de l'information sur un site communautaire ? qui est auteur d'un document recomposé ? comment les annotations de chacun sont-elles acceptées, contredites ou partagées ? quelles nouvelles plates-formes définir pour faciliter / limiter ces pratiques ? quelle gestion temporelle de la validité, des versions, des évolutions de documents et d'informations ?

On retrouve aussi les problématiques de partage et d'accès à l'information, d'interopérabilité et de recherche. La dématérialisation des supports d'information alimente donc des recherches interdisciplinaires dont les perspectives renvoient à la place que la technologie prend auprès des utilisateurs, producteurs ou demandeurs d'information. Étudier les nouveaux défis qui se posent ne peut être laissé au seul point de vue technique, et requiert des analyses informationnelles, cognitives, linguistiques, sociologiques, éthiques...

#### **4/ Une recherche au coeur de l'évolution des sociétés sous l'impulsion des technologies de l'information et de la communication**

Au cours du dernier siècle, le développement des moyens de représentation et de traitement informatique, a permis de faire porter l'instrumentation sur le contenu lui-même : adaptativité et plasticité des interfaces, intelligence des moteurs de recherche, systèmes de recommandation, ontologies et réseaux sémantiques, réseaux sociaux pour la création de communautés d'intérêt, infrastructures de production collaborative et de partage. Le secteur de l'éducation, de la formation, et plus

largement de l'apprentissage humain sous toutes ses formes, ont engagé une mutation des pratiques sous l'impulsion de ces technologies avec des exigences d'adaptabilité, de flexibilité et d'efficacité qui soulèvent des problèmes d'une grande diversité sollicitant la contribution d'un large éventail de disciplines dont celles de l'information et de la communication, et de l'informatique. Les principaux problèmes s'organisent autour de la question du passage des modèles et des méthodes de ces disciplines à leur mise en oeuvre dans des dispositifs informatiques, de la question de l'ingénierie des situations permettant les apprentissages et de l'évaluation de l'efficacité des technologies dans les divers contextes d'usage à l'école ou sur le lieu de travail, pour des besoins privés ou professionnels, par des utilisateurs aux compétences et aux besoins d'une grande diversité (de l'enfant à la personne âgée, sous la contrainte d'handicaps ou de pathologies cognitives ou motrices).

Les grands problèmes, dont la résolution aura un impact économique et social fort, s'organisent autour de quelques thématiques dont on voit l'émergence rapide pour les usages généraux des technologies de l'information et de la communication :

- Comprendre et concevoir de nouvelles formes d'interaction pour une meilleure qualité et efficacité de l'enseignement et la formation, en s'appuyant sur les technologies de l'internet (Web 2.0, wikis, technologies mobiles, réalité virtuelle et augmentée, etc.) et en créant des contextes au sein desquels les apprenants, enseignants et formateurs puissent s'approprier de nouveaux types de dispositifs (learning games, communautés d'apprentissage, espaces intégrés d'apprentissage / learning spaces, dispositifs mobiles et ubiquité, interfaces tangibles, simulations et interfaces haptiques pour l'apprentissage du geste et de savoirs tacites).

- Modéliser les temporalités, les structurations spatiales et sociales associées à ces nouvelles formes d'interaction et leurs conséquences sur l'apprentissage et l'émergence de nouveaux savoirs.

- Étudier les articulations entre différents types de situations d'apprentissage, notamment les relations entre apprentissage informel et apprentissage dans les institutions scolaires ou de formation, ainsi que les articulations entre technologies et pratiques institutionnelles.

- Comprendre, modéliser et concevoir des ressources pour l'apprentissage, en faciliter l'accès et les usages en exploitant les outils de recommandation, l'exploration sémantique pour la mise en relation des ressources, ou des ressources et des besoins identifiés, ou encore des utilisateurs entre eux par le biais des ressources partagées (communautés d'apprentissage, apprentissage collaboratif).

- Étudier les phénomènes d'appropriation des dispositifs par leurs utilisateurs (enseignants, apprenants, tuteurs) dans la construction de nouveaux rapports à la connaissance (induites par les propriétés des interfaces) et les processus de socialisation impliquant des problématiques d'identité, de sécurité et de confiance.

- Comprendre, anticiper, accompagner l'évolution des métiers de l'enseignement et de la formation par le soutien aux nouveaux usages et la conception d'outil permettant de les instrumenter (outils de scénarisation pédagogique, orchestration des outils d'apprentissage, production et partages de ressources, outils de suivi et de gestion des apprentissages)

- Concevoir et déployer des standards et principes de normalisation permettant l'interopérabilité, la réutilisation et le développement partagé des technologies.

### **5/ Comprendre l'évolution des activités et des structures sociales médiatisées par les technologies de l'information et de la communication**

Au-delà d'usages spécifiques (archivage, publication, enseignement), les technologies de l'information et de la communication ont permis le développement de dispositifs très génériques qui sont utilisés dans la vie quotidienne de façon très large : téléphones mobiles de diverses générations, formes variées de courrier électronique, world wide web, instru-

ments de gestion de la sociabilité (appelés souvent « réseaux sociaux »), accès à des ressources multimédia de toutes sortes, etc. Les activités sociales les plus diverses, de l'exercice professionnel le plus spécialisé à la sociabilité la plus générique, aux relations familiales, ou aux pratiques culturelles, s'appuient de façon toujours croissante sur ces dispositifs, ce qui ouvre des possibilités d'évolution que les sciences sociales cernent encore très insuffisamment.

Il n'est pas possible évidemment d'être exhaustif dans un texte de synthèse comme celui-ci, mais l'on peut citer rapidement quelques exemples d'interrogations sur ces évolutions. Comme le montre la sociologie des usages (ou plus généralement les « medias studies »), les usages débordent toujours ce qui était anticipé par les concepteurs de ces dispositifs, qui pourtant les contraignent aussi, ce qui génère une tension entre « usages prescrits » et « usages réels », tension dont l'équilibre est toujours précaire. L'inégal accès aux dispositifs est à l'origine de la problématique de « fracture numérique ». L'exercice de nombreuses professions évolue avec l'intégration des dispositifs de communication les plus récents. Les travaux sur les médecins, les journalistes et quelques autres métiers montrent un brouillage de plus en plus important de la démarcation entre experts et profanes, ce qui transforme les processus de professionnalisation et de légitimation. Les recherches sur les réseaux sociaux (au sens traditionnel de l'« analyse des réseaux sociaux », c'est-à-dire de relations concrètes entre acteurs sociaux, quels que soient les supports sur lesquels ces relations sont activées), sont encore très loin de rendre compte des évolutions associés aux usages des nouveaux dispositifs : La taille des réseaux s'accroît-elle ? Comment évolue leur composition ? Les liens créés ou entretenus au moyen des nouveaux dispositifs sont-ils socialement plus homogènes (plus ségrégatifs) ou permettent-ils au contraire une plus grande

mixité sociale ? Comment évoluent les liens à l'espace et au temps dans un monde « connecté » ? Comment développer des méthodes adaptées à ces activités « médiées par les techniques », tant sur la plan qualitatif (ethno-

graphie virtuelle, analyses vidéos, etc.) que quantitatif (données de sonde, analyse de grands corpus disponibles en ligne) ?

Les changements encore récents des modes de diffusion de l'information et d'échange des savoirs, aujourd'hui plus libres et à plus grande échelle (internet, blogs, réseaux sociaux...), modèlent la société moderne et modifient ou offrent la possibilité à chaque individu de modifier son rôle au sein cette société. Une des questions qui peut alors se poser est celle de l'impact qu'aura cette liberté de savoir sur la construction de l'identité personnelle et de la relation avec autrui. Les travaux en psychologie du développement montrent que la construction de l'identité commence dès l'enfance pour se poursuivre à l'âge adulte, par divers processus émotionnels, sociaux et cognitifs, processus intimement liés à l'environnement selon la théorie wallonienne (théorie épigénétique). Le risque d'excès d'informations (parfois contradictoires, ou mal étayées) généré par l'ouverture des modes de communications modernes aura-t-il un effet bénéfique sur la psychologie individuelle (meilleure conscience de soi) ou à l'inverse un impact délétère sur la création d'identité (générant ainsi des comportements inadaptés, voire à risque, notamment chez les adolescents, dans le but d'« exister » dans un monde devenu plus « visible » et plus « voyeur ») ?

La section 42 est un lieu privilégié pour accueillir les chercheurs travaillant sur ces thèmes.

## CONCLUSION

Les perspectives ouvertes peuvent être articulées à la prise en compte de domaines susceptibles de devenir des lignes forces au cours du siècle à venir. La convergence entre dispositifs électroniques et/ou nano technologiques et systèmes biologiques peut être au cœur de l'évolution des équipements et des usages en matière de communication. Les

questionnements s'inscrivent dans le prolongement des sujets soulevés par l'informatique et les réseaux électroniques, mais ils toucheront également des enjeux éthiques fondamentalement nouveaux. Si l'expression « homme augmenté » est un véritable sujet depuis les années 1960, sa transposition aux frontières des sciences de la vie en bouleverse les données.

Le développement de recherches abordant l'économie et le droit de la communication, en lien avec les usages et l'émergence de nouveaux paradigmes technologiques semblent également s'imposer. Une interdisciplinarité forte y est indispensable pour créer des savoirs validés et autonomes au regard d'acteurs puissants et créateurs de savoirs « adaptés ».

La dynamique mise en place par la CID 42, a donc confirmé la place cruciale de la communication et la nécessité impérieuse d'en faire un domaine d'étude à part entière au carrefour entre sciences formelles et sciences de l'homme de la société. La procédure du concours fait émerger une communauté de jeunes docteurs aux profils nouveaux. Elle reflète la diversité d'un champ en cours de construction. La démarche spécifique portée par la CID 42 fait que les « Sciences de l'Information et de la Communication », au sens de la section 71 du CNU y prennent une place importante sans en constituer un élément majeur. Les disciplines incluses dans le champ défini pour la CID sont de manières différentes mais à des niveaux relativement homogènes très largement présentes.

Les questions de communication conduisent à mobiliser et à inventer des méthodes elles aussi fruits de partenariats entre des corpus de connaissances non connectés jusqu'ici pour traiter des données en masse, pour inventer de nouveaux modes de représentation des ensembles complexes, pour fabriquer de nouveaux types de dispositifs de saisie des phénomènes à étudier... L'expérience des deux concours 2009 et 2010 est en cela très éclairante. Les dossiers livrent au regard un large éventail de profils solides scientifiquement, totalement en phase avec les critères d'excellence propres à leur discipline. Il révèlent également des positionnements très originaux tant

du point de vue des terrains abordés que des méthodologies mobilisées.

Si les meilleurs dossiers issus des SHS sont présentés par des candidats issus de disciplines anciennement structurées sur le plan épistémologique il est particulièrement encourageant de noter qu'ils sont en mesure de s'appuyer sur ce socle pour formuler des projets très innovants fortement interdisciplinaires au sein des SHS et vigoureusement tournés vers des objets et des partenariats relevant du domaine des sciences formelles. Les potentialités offertes par la CID 42 leur ont permis de franchir un pas et d'assumer leur volonté d'inscrire pleinement leur recherche relative à la communication dans les enjeux sociétaux.

Cette démarche trouve sa symétrie dans les disciplines relevant des sciences formelles. En pointe on trouve fort logiquement les jeunes docteurs issus des champs les plus directement reliés au périmètre de la CID comme l'informatique, mais également des candidats relevant d'autres disciplines, reliées par exemple aux sciences de la vie et qui ne peuvent concevoir leur rôle de chercheur hors d'interactions fortes avec les questionnements sociétaux. En ce sens la CID 42 se situe à un point de convergence unique entre des espaces de recherche jusqu'alors cloisonnés, au croisement des sciences de l'Homme et de la Société et des Sciences formelles.

C'est donc là qu'est le principal enseignement à valeur prospective de deux années d'activité. Un vivier existe bien pour l'interdisciplinarité autour de la communication en lien avec les questionnements mis en lumière par ce court rapport. Les axes qui y sont présentés ont tenté, trop partiellement sans doute, de signaler les points forts susceptibles d'être prolongés et les manques qu'il est urgent de combler. Il semble de surcroît qu'au delà de ces « tendances » il est crucial de poursuivre ce travail de mise en mouvement, de brassage dont il résulte des propositions véritablement neuves. Plus que dans d'autres domaines peut être, la communication gagne à être appréhendée par des projets co-construits s'inscrivant dans un processus de bottom-up. Le fait que les candidats appartiennent désormais à cette généra-

tion qui a connu depuis son enfance les technologies numériques ne doit pas être négligé. Si le domaine correspond donc aux besoins du CNRS, tels qu'il les a exprimé par la création de l'ISCC et de la CID, il correspond également, et nous pourrions penser que cela est encore plus important, à une attente forte d'une part significative de jeunes universitaires, solidement

ancrés dans leur discipline mais qui conçoivent mal leur carrière et le sens qu'ils pourraient donner à celle-ci dans les cadres disciplinaires anciens.

*Pascal Griset  
président de la CID 42.*



## MODÉLISATION DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES, BIOINFORMATIQUE

### *Président*

Olivier GASCUEL

### *Membres de la section*

Philippe BENAS

Christine BRUN

Dominique BURNOUF

Alexandre DE BREVERN

Alain DENISE

Nicolas DESTAINVILLE

Bertrand DUBUS

Laurent DURET

Blaise GENEST

James LEDOUX

Olivier MARTIN

Irina MIHALCESCU

Laurent NICOLAS

Benoît PERTHAME

Nadine PEYRIERAS

Jean SALAMERO

Françoise SCHOENTGEN

Marie-Christine SLOMIANNY

La biologie à grande échelle est à l'origine d'une masse considérable de données qui concerne tous les niveaux du vivant :

- les gènes, les protéines et leurs interactions,
- les génomes, leur dynamique et leur évolution,
- les cellules, leur organisation et les mécanismes moléculaires sous-jacents,
- les organes et leur fonctionnement,
- les organismes et leur physiologie,
- les espèces et populations,
- les systèmes écologiques.

L'exploitation de ces données est au cœur de la CID43. Elle requiert à la fois des modèles mathématiques et physiques qui représentent les lois complexes du vivant, et des travaux en informatique pour simuler ou estimer ces modèles, fouiller les données, et pour intégrer toutes ces sources d'informations hétérogènes au sein de bases de données et de connaissances. L'objectif est une meilleure compréhension du vivant, avec des enjeux dans tous les domaines, médicaux, pharmaceutiques, environnementaux et agronomiques. Les années passées ont vu ces disciplines se développer de façon extraordinaire. Les articles les plus cités aujourd'hui, toutes sciences confondues, sont liés à l'exploitation informatique des don-

nées génomiques. Le mouvement continuera très certainement. La biologie de demain sera largement faite par des biologistes « secs », modélisateurs et/ou bioinformaticiens travaillant sur ordinateur plutôt qu'à la paillasse (dite « humide »). L'objectif de la CID43 est de favoriser les recherches dans ces domaines d'interface, en mettant en avant des chercheurs et des travaux innovants sur le plan méthodologique et répondant à des questions biologiques importantes. On trouvera dans la suite les principaux axes de recherche concernés, avec un regard plutôt biologique tout d'abord (quelles grandes questions biologiques?), puis plutôt méthodologique (quels modèles? quels algorithmes? quelle intégration des données?). Ces deux regards sont le plus souvent indissociables, mais ce mode de présentation facilitera la lecture par les tenants des différentes disciplines d'origine. Finalement, on tracera un rapide état des lieux, avant de conclure par les recommandations essentielles. Un glossaire explicitant les termes techniques est donné à la fin du document.

## **GÉNOMIQUE COMPARATIVE ET FONCTIONNELLE**

On a pu croire qu'après le séquençage du génome humain la course aux génomes allait ralentir. On assiste en réalité à une forte accélération. Cette accélération, facilitée par l'apparition de nouvelles techniques de séquençage rapides et peu coûteuses, est due à l'intérêt de comparer les génomes et d'explorer les divergences évolutives à différentes échelles, depuis les études intra-spécifiques jusqu'aux analyses regroupant les grands domaines du vivant. À ce jour, environ 1 000 génomes de bactéries, archées ou eucaryotes sont entièrement séquencés et disponibles publiquement. Grâce à ces données et aux nouvelles approches « phylogénomiques », c'est à dire se fondant non pas sur l'analyse de quelques gènes

mais sur l'intégralité du génome, il devient envisageable d'élucider la phylogénie du vivant. Ce large échantillonnage taxonomique est particulièrement utile pour l'annotation des génomes (c'est-à-dire l'identification des gènes et autres éléments fonctionnels) par analyse comparative de séquences. Ces données offrent également une opportunité unique pour analyser la variabilité des répertoires de gènes et ainsi mieux comprendre l'adaptation des espèces à leur environnement (et notamment l'évolution de la virulence chez des organismes pathogènes). Le séquençage massif ouvre la voie à la « génomique des populations » – c'est-à-dire à l'analyse de la variabilité génétique au sein d'une population à l'échelle génomique. Ainsi, le projet de séquençage de 1 000 génomes humains (dont la publication est prévue d'ici fin 2010), permettra non seulement de connaître l'histoire et la dynamique des populations de notre espèce mais également d'identifier les régions du génome soumises à pression de sélection (et donc impliquées dans l'adaptation de l'homme à son environnement), et d'analyser les mécanismes mutationnels à l'origine de la diversité génétique. Ces données serviront également de référence pour identifier des mutations impliquées dans des pathologies. Ainsi, le séquençage de génomes complets est une approche très prometteuse pour l'identification des mutations ponctuelles ou des aberrations chromosomiques impliquées dans des cancers. Enfin, le séquençage massif est aujourd'hui une technique de choix pour analyser la biodiversité au sein d'un écosystème (par exemple les projets de « métagénomiques » pour analyser la diversité microbienne ou virale).

De plus, les progrès des techniques de séquençage ont ouvert la voie à de nombreux autres champs d'application. Désormais le séquençage « haut débit » permet d'analyser et quantifier l'expression des gènes (RNAseq), de détecter les interactions ADN-protéine (ChIPseq) ou ARN-protéine, de quantifier la méthylation de l'ADN (MethylC-Seq), d'analyser les processus de réplication, de recombinaison, l'organisation des chromosomes dans le noyau (C5), etc. Ainsi, il devient possible non seulement d'étudier la diversité génétique

(entre individus ou entre espèces), mais également les modifications épigénétiques des chromosomes et leurs conséquences sur l'expression des gènes. Bref, ces nouvelles techniques révolutionnent l'étude de l'organisation et du fonctionnement des génomes.

Par ailleurs, les progrès techniques ne sont pas limités au séquençage. On assiste à la multiplicité des «-omics» (proteomics, metabolomics etc.). Toutes ces nouvelles approches ont transformé la biologie moléculaire moderne d'une science «pauvre en données» en une science «riche en données». Cette nouvelle donne représente un défi pour la bioinformatique. D'une part, le volume de données à traiter pose des difficultés algorithmiques importantes. D'autre part, les changements dans la nature même des données imposent de nouveaux développements (par exemple les méthodes statistiques développées pour l'analyse de données de puces à ADN ne sont pas directement transposables aux données de RNAseq; les outils d'alignement de séquences couramment utilisés – tels que BLAST – ne sont pas adaptés aux nouveaux types d'analyse de séquence). Les enjeux sont considérables car ces nouvelles données permettent d'envisager, dès à présent, des analyses intégrées allant des séquences complètes des génomes aux conséquences phénotypiques de mutations, en passant par les aspects structuraux et fonctionnels sur les différents acteurs cellulaires. Face à ce volume croissant de données complexes et hétérogènes, l'intégration des données couplées à des analyses bioinformatiques comparatives et prédictives est cruciale pour réaliser la description étendue de la fonction d'un gène et de la compréhension de son rôle non seulement au niveau moléculaire, mais également aux niveaux supérieurs des complexes macromoléculaires, des voies cellulaires, de la cellule, de l'organe et de l'organisme.

## BIOINFORMATIQUE STRUCTURALE

Le défi de la bioinformatique structurale est d'établir des liens entre la structure des macromolécules biologiques et leurs fonctions dans la cellule ou l'organisme. Sur le plan structural, les nombreux niveaux de complexité des molécules biologiques (ARN, ADN, protéines) doivent être pris en compte: structure primaire, secondaire, tridimensionnelle, quaternaire et structure des complexes multimoléculaires. Sur le plan fonctionnel, ce sont les aspects organisationnels de la matière biologique qui doivent être décryptés: aspects dynamiques et évolutifs, déplacements, assemblages, modes d'action, interactions, régulations et modulations des macromolécules et des systèmes macromoléculaires.

La bioinformatique structurale s'appuie d'une part sur les nombreuses données fournies par les grands projets de génomique et de génomique structurale, et d'autre part sur les données hétérogènes apportées par les diverses branches de la biologie, les domaines interdisciplinaires en émergence et les nouveaux développements technologiques. On peut définir quatre grands champs d'action pour la bioinformatique structurale :

- Un premier domaine d'action concerne le repliement des protéines et la prédiction de structures: identification et classification de motifs structuraux, développement de méthodologies comparatives au niveau structural, phylogénie structurale, analyse structurale prédictive des séquences/structures (ADN, ARN, protéines), problème inverse du repliement, modélisation par homologie à grande échelle.

- Un deuxième champ d'action relève de la modélisation et de la dynamique des macromolécules. Il se situe à l'interface avec les techniques de biologie structurale expérimentale: reconstruction de gros édifices 3D en utilisant des données hétérogènes (cryoEM, AFM, co-cristallographie, RMN du liquide et du solide, SAXS, méthodologies basées sur la fluorescence, imagerie moléculaire); ces secteurs

nécessitent des couplages entre les outils informatiques actuels et les nouveaux développements méthodologiques, mais aussi la mise en place de nouvelles démarches et méthodes d'analyse.

– Un troisième champ d'investigation concerne les machineries moléculaires avec la compréhension des mécanismes d'assemblage macromoléculaires (approches multi-échelles), des forces mises en jeu (expérimentations sur molécules uniques) et de la dynamique de ces assemblages. Les domaines concernés sont notamment les assemblages multiprotéiques, mais aussi l'auto-assemblage de membranes lipidiques, la simulation en dynamique moléculaire de gros systèmes associant protéines, membranes, ARN ou ADN (ribosome, facteurs de transcription, protéines membranaires modélisées dans leur environnement).

– Un quatrième champ d'action, concerne les interactions protéines-ligands ou substrats et les interactions protéine-protéine impliquées dans des voies métaboliques ou de signalisation cellulaire, ainsi que les mécanismes de modulation et de régulation de ces voies. Ce domaine d'étude s'appuie sur les données apportées par les techniques de la biologie moléculaire et cellulaire (telles que le double hybride, le TAP/MS, les puces à ADN et à protéines, l'imagerie des interactions *in vivo* de FRET ou par FCS). Il inclut la simulation des mouvements moléculaires (domaines, approches de ligands), les technologies d'ingénierie *in silico* de protéines ou de ligands, la prédiction des régions d'interaction et la prédiction des fonctions des protéines à partir de leurs réseaux de partenaires et de leurs régions d'interaction.

## IMAGERIE *IN VIVO* DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

Les progrès de la bioinformatique structurale, tels qu'ils viennent d'être rapportés se

complètent aujourd'hui d'approches qui permettent de révéler et de quantifier la dynamique des processus moléculaires à l'échelle du vivant. Ces dernières années, les avancées en microscopie multidimensionnelle et multimodale couplées aux nouvelles techniques de marquage par sondes fluorescentes types GFP (« Green Fluorescent Protein ») ont révolutionné la biologie moléculaire et cellulaire. L'imagerie photonique dite à haute résolution spatiale et temporelle joue désormais un rôle essentiel pour sonder les processus moléculaires des interactions des protéines (expression et fonction des gènes) dans différents compartiments ou domaines cellulaires. Ainsi, des avancées considérables en biologie fondamentale ont déjà été obtenues dans la description des principales voies de transport membranaire, dans les mécanismes de tri et d'adressage des protéines et dans le maintien ou la défaillance de l'intégrité fonctionnelle de la cellule. Il est également établi que certaines protéines interagissent fonctionnellement et dynamiquement dans des sous-domaines de chaque compartiment, ceci pour assurer des fonctions vitales à des échelles spatiales et temporelles variées et sur l'ensemble du cycle cellulaire, que les cellules soient en division ou en interphase. Plus généralement le défi à relever désormais est d'acquérir une vue quantifiée plus complète de la physiologie de la cellule pour toutes les échelles d'observation spatiales, « nano », « micro » et temporelles. Enfin, une telle imagerie *in vivo* à une échelle d'introspection subcellulaire est aujourd'hui accessible dans des systèmes multi-cellulaires plus complexes.

Mais force est de constater que l'analyse des données de microscopie collectées, ne serait-ce que ces cinq dernières années, *via* différentes modalités de microscopie optique (modalités d'imagerie Nipkow Disk CLSM, FLIM-FRET, TIRF, SIM, STED...) et électronique, reste problématique. Il faut en effet traiter des quantités considérables d'images tridimensionnelles. Leur contenu est relativement nouveau et original, mais leur traitement est réalisé avec des algorithmes d'analyse d'images limités et peu adaptés désormais. Notons que l'analyse visuelle de ces données-images est devenue quasiment impossible puisqu'il s'agit

d'inspecter des centaines de séquences temporelles d'images volumiques de plus en plus souvent acquises automatiquement (High Throughput imaging, High Content Screening), voire de les manipuler lors du passage d'une échelle à l'autre, par exemple dans le cadre d'imagerie corrélative (CLEM). Toutes les informations partielles ou descripteurs extraits automatiquement doivent être intégrés dans des modèles biologiques ou biophysiques à des fins de prédiction, pour des applications dans le domaine de la santé notamment. Dans un tel contexte, nous sommes confrontés à la fois aux problèmes de gestion de « masses de données », d'estimation en « grande dimension », de modélisation de « systèmes complexes » et de « changements d'échelles », dont il est aussi question dans le chapitre qui suit.

## BIOLOGIE DES SYSTÈMES

La biologie des systèmes étudie les processus biologiques considérés comme des systèmes complexes, multi-échelles et dynamiques. Elle apporte une vision intégrée de leur fonctionnement. Ces systèmes sont formés par des métabolites, des macromolécules, des cellules, des organes et/ou encore des organismes organisés en réseaux d'interactions.

Jusqu'à présent, deux approches majeures se sont développées parallèlement en biologie des systèmes. Elles se distinguent non seulement « historiquement » mais aussi par leurs objectifs, par la nature des données traitées et les méthodes mathématiques et informatiques auxquelles elles font appel. L'une, héritière de la biologie mathématique, modélise la dynamique de processus biologiques particuliers, à partir de données qualitatives et quantitatives généralement issues d'expériences à petite échelle. L'autre, plus récente, impulsée par le développement des « omiques » et de la bioinformatique, analyse et interprète

des données produites par des expériences réalisées à haut-débit.

De manière intéressante et attendue, la convergence actuelle des deux sous-thématiques de la biologie des systèmes signe leur maturité respective. D'une part, les progrès en gestion, analyse et intégration des données « omiques » permettent leur utilisation en modélisation, pour l'amélioration des modèles et pour la validation des prédictions. D'autre part, la modélisation de grands réseaux est maintenant possible grâce aux avancées théoriques telles que la réduction de modèle ou les approches modulaires ou hiérarchiques. Les toutes prochaines avancées de la biologie systémique, fruits de cette convergence, devraient faire définitivement admettre l'aspect biologique fondamental de la discipline.

En fait, les apports de la biologie systémique ces dernières années ont déjà modifié notre perception des processus biologiques et parfois au delà. Par exemple, l'importance des circuits et autres motifs (tels que les « feed-forward loops ») dans les réseaux de régulation de gènes ouvre de nouvelles perspectives pour la compréhension des mécanismes moléculaires de régulation spatio-temporelle de l'expression génique. De nouveaux marqueurs/acteurs de pathologies humaines difficilement identifiables par les approches de gènes candidats classiques, ont été découverts suite à des analyses globales. Enfin, la robustesse des réseaux biologiques nous fait prendre conscience des limites de l'espace des systèmes biologiques sur lequel nous pouvons agir à des fins d'intervention, de contrôle ou de régulation. Seule une compréhension globale des réseaux d'interactions permettra de dégager de nouvelles pistes pour les développements en thérapie humaine. À ces fins, l'élucidation des liens entre génotype et phénotype par l'analyse des réseaux constitue un enjeu important de la biologie des systèmes actuelle, qui pourrait ouvrir de nouvelles voies, des biotechnologies à la médecine personnalisée.

## BIOLOGIE INTÉGRATIVE

Les propriétés systémiques des organismes vivants tels que l'homéostasie et ses corollaires de robustesse et de résilience sont des propriétés émergentes à un niveau global qui doivent pouvoir être comprises à partir des dynamiques observées à un niveau « micro » (génétique, moléculaire, cellulaire) ou « méso » (tissu, organe). Il s'agit alors de concevoir les fondements théoriques et les stratégies expérimentales pour la reconstruction des dynamiques multi-échelles de l'organisme tout au long de son cycle de vie, corrélant génotype et phénotype et intégrant causalités ascendante (du micro vers le macro) et descendante (du macro vers le micro). C'est l'objet même de la biologie intégrative, qui fonde ses stratégies sur l'observation *in vivo* et l'intégration des processus biologiques à l'échelle cellulaire dans l'organisme entier.

Les initiatives des communautés internationales organisées autour du concept de « physiome » ou encore d'approches « systèmes complexes » se retrouvent autour d'une interdisciplinarité ou protocoles expérimentaux, acquisition de données et reconstruction phénoménologique puis théorique sont pensés ensemble. Il s'agit de fonder une description formelle des processus sur les mesures acquises à partir de l'observation *in vivo* des phénomènes aux échelles spatiales et temporelles adéquates. La reconstruction phénoménologique, étape d'extraction des mesures à partir des observations d'imagerie multimodale 3D+temps, nécessite des stratégies relevant des mathématiques appliquées et de l'informatique (filtrage, segmentation, détection et suivi spatio-temporel d'objets) pour conduire à un premier niveau de corrélations spatio-temporelles et de modélisation qualitative et prédictive. La description quantitative des phénomènes permet alors d'envisager une modélisation théorique et explicative des processus et leur simulation informatique (voir par exemple la morphogenèse de *Dictyostelium discoïdum* en fonction de la production d'AMPc, ou la croissance racinaire chez *Arabidopsis thaliana*

en fonction de la production et du transport de l'auxine, ou encore la formation des somites chez les vertébrés en fonction de l'oscillation couplée de l'expression génétique des facteurs de transcription *her*). Les prédictions fournies par les modèles font l'objet d'un retour vers l'expérience avec la mise en œuvre de stratégies de perturbation propres à la biologie (notamment : gain ou perte de fonction génétique, perturbation mécanique, ablation ou transplantation de cellules ou de tissus).

Le niveau d'organisation cellulaire est sans doute le niveau d'intégration obligé des dynamiques multi-échelles de l'organisme. En effet, la cellule est l'intégron des processus métaboliques, moléculaires et génétiques, et de ses interactions avec l'environnement cellulaire, multicellulaire et tissulaire. L'observation *in vivo*, la mesure et l'analyse des comportements cellulaires exprimés en termes de position, de trajectoire, de prolifération, d'interactions, de déformation, de mobilité, de différenciation et d'identité, font l'objet de nouveaux développements méthodologiques (voir par exemple les méthodes d'analyse cinématique de populations cellulaires en division dans un organisme). Ces mesures sont essentiellement obtenues à partir de l'analyse d'images 3D+temps *in vivo*, et la biologie intégrative motive actuellement nombre des développements dans ce domaine.

Le couplage entre les niveaux d'organisation du vivant nécessite l'observation et la mesure simultanée de paramètres à ces différents niveaux (par exemple observation et mesure simultanée de morphodynamiques cellulaires et d'expressions génétiques ou d'activités métaboliques au moyen de rapporteurs fluorescents). Le défi expérimental et méthodologique est considérable et peu de propositions ont été faites pour intégrer les dynamiques moléculaires, génétiques et cellulaires dans l'organisme. Les difficultés viennent notamment de l'absence de données adéquates en termes de résolution spatiale et temporelle pour modéliser la dynamique des réseaux d'interactions moléculaires et génétiques dans le contexte des déplacements et des divisions cellulaires dans l'organisme. Un autre pan de

recherche en lien avec la biologie des systèmes est de construire des modèles spatialisés prenant en compte le devenir individuel de chaque cellule et de ses différents compartiments.

Enfin, la prise en compte de l'importance de la rétroaction des niveaux macroscopiques sur les niveaux microscopiques suscite de nouvelles voies de recherches tant au plan expérimental que formel. Il s'agit en particulier d'observer et de mesurer les coordinations à longue distance, mécaniques, chimiques, électriques dans l'organisme entier et de mettre en évidence les propriétés «immergentes» (du macro vers le méso et le micro) autant que les propriétés «émergentes» (du micro vers le méso et le macro). On peut signaler parmi les résultats marquants dans ce domaine, la mise en évidence des transductions mécaniques au cours de l'embryogenèse de la *Drosophile*.

## **ÉVOLUTION ET ADAPTATION : DU GÈNE À L'ÉCOLOGIE**

L'évolution et l'adaptation forment un autre grand pan de la biologie. Les objets biologiques sont issus d'un processus d'héritage et de mutations, et ceci à toutes les échelles, du gène aux systèmes écologiques en passant par les espèces. Comprendre et retracer l'évolution de ces objets est souvent un pas décisif dans la compréhension de la fonction (par exemple, des gènes), dans l'élucidation de la structure (par exemple, des protéines), ou de la place dans un ensemble complexe (par exemple, des espèces au sein des écosystèmes). Retracer l'évolution apparaît également essentiel dans l'étude des maladies émergentes ou en évolution constante, telles que le SIDA, le SARS ou la grippe. Les études évolutives sont au centre des grands projets internationaux sur l'Arbre de la Vie, qui est la phylogénie de l'ensemble des espèces contemporaines et constituera un

répertoire remarquable de la biodiversité globale.

Cette capacité à comprendre et modéliser le passé devrait prendre une nouvelle dimension dans ses applications écologiques avec les études sur le réchauffement climatique. Comment les espèces s'adapteront-elles? Quels nouveaux équilibres entre espèces se formeront localement, quelles seront les impacts sur les sociétés humaines? Ces questions se posent naturellement dans un contexte multidisciplinaire : la formalisation mathématique y est variée et ancienne ; les méthodes informatiques avancées sont indispensables ; le couplage de logiciels climatiques et de dynamique des populations est à l'ordre du jour. La modélisation biologique et environnementale, ainsi que l'intégration des données génomiques, phénotypiques, écologiques, et climatiques, sont fondamentales et nécessaires.

## **MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET MÉTHODES STATISTIQUES**

Toute science passe depuis des siècles par l'analyse des données et la modélisation, toutes deux de nature mathématique. La physique et la chimie sont sorties d'un mode descriptif au dix-huitième siècle avec la mise en équation de l'attraction des corps ou des réactions chimiques. Si la biologie a longtemps échappé à ces approches formelles – il y a des contre-exemples, tels les modèles proie-prédateurs ou les dynamiques de populations –, c'est clairement du fait de sa complexité et du manque de données quantitatives fiables.

Ce mot, «complexité», est celui qui caractérise en premier les domaines d'interdisciplinarité reconnus (le cerveau, l'univers, les sciences sociales). Suivant un mécanisme curieusement observé tout au long de l'histoire des sciences, la disponibilité des outils abstraits va de pair, et souvent précède leur emploi dans

les disciplines « concrètes ». Aujourd'hui les outils conceptuels, au premier rang desquels les outils mathématiques, ont acquis depuis environ un siècle, la capacité de traiter de tels problèmes complexes : les fonctions dérivables ont cédé le pas au mouvement brownien, les espaces euclidiens à des espaces de Hilbert de dimension infinie, les équations différentielles ordinaires partagent le terrain avec des systèmes dynamiques et des équations aux dérivées partielles, l'analyse des données ne se fait plus à la main mais avec des outils statistiques bien établis et toujours plus sophistiqués.

Cette complexité se reflète d'abord par une complexité accrue des modèles mathématiques, faisant souvent appel – ce qui est symptomatique de l'ampleur des problématiques – à des domaines relevant des maths dites « pures » : c'est le cas des systèmes dynamiques et des graphes, par exemple pour les processus biochimiques, leur fonctionnement et leur évolution. C'est également le cas de la théorie des jeux, pour ce qui concerne les systèmes écologiques et leurs fragiles équilibres. C'est aussi le cas de la géométrie appelée à jouer un rôle central, non seulement pour modéliser dans l'espace usuel les positions relatives des molécules pour mieux comprendre leurs interactions (par exemple, notion de site actif présenté à un substrat), mais surtout pour rendre compte dans des espaces de très haute dimension (espaces de lacets, par exemple) de la topologie des molécules biologiques (brins d'ADN, par exemple) et de leurs mouvements possibles (repliement, ouverture...) sans doute le long de géodésiques dans ces espaces complexes. Cette complexité devrait aussi conduire à des modélisations multi-échelles pour lesquelles des événements de natures différentes (événements moléculaires de nature stochastique, événements cellulaires et tissulaires plus déterministes) seront intégrés dans un même modèle utilisant des formalismes adéquats et différents selon les niveaux.

Mais les mathématiques plus traditionnellement tournées vers les applications ont connu, ces dix dernières années, un important développement vers l'interaction mathématiques-biologie. Les équations différentielles

modélisent la dynamique moléculaire. Les équations aux dérivées partielles servent à comprendre toutes les échelles du vivant depuis le trafficking moléculaire dans la cellule, l'auto-organisation spatiale de communautés cellulaires, jusqu'à l'organe ou l'évolution darwinienne. Dans tous ces domaines la modélisation probabiliste et statistique est fondamentale, par exemple pour représenter les événements rares, ou les niveaux « individus centrés » plutôt que la population. Et bien sûr, tous les modèles devant être choisis sur des critères d'ajustement aux observations, tous leurs paramètres devant être estimés, toute hypothèse devant être testée, les statistiques sont centrales dans cette interdisciplinarité.

Il apparaît en effet clairement que le principal goulot d'étranglement dans les recherches actuelles et futures en biologie ne se situe pas dans la production de données, mais dans la capacité à les analyser et à les exploiter. Cette accumulation de données impose d'importants développements en statistiques. De nombreuses méthodes statistiques ont été publiées ces dernières années pour l'analyse de données de puces à ADN (étude des transcriptomes et des variants d'épissage, détection de variations de nombre de copie d'ADN, ou encore identification de sites de fixation de protéines sur le génome). Cependant, ces méthodes basées sur l'analyse d'un signal continu ne sont pas directement transposables aux nouvelles approches par séquençage (RNAseq, ChipSeq, etc.) qui produisent des comptages. Ces développements requièrent une véritable pluridisciplinarité. En effet, le gain de puissance dans la détection de signaux que permettent les approches de séquençage « haut débit » s'accompagne également d'une plus forte sensibilité aux biais expérimentaux, liés à la préparation des échantillons biologiques ou aux techniques de séquençage elles-mêmes. Ainsi, le développement de ces méthodes statistiques requiert une bonne connaissance de la biologie et des techniques expérimentales pour pouvoir interpréter ces biais. Le séquençage 'haut débit' est cité ici en exemple, mais ce n'est évidemment pas le seul champ d'application des statistiques. En santé, les études d'association au

niveau du génome et autres approches de « génétique génomique » requièrent le développement de meilleurs modèles (statistiques ou mécanistiques) reliant le phénotype au génotype et devront mieux tenir compte de la structuration des populations. Les études de génétique des populations et d'évolution, exigent également des développements méthodologiques importants.

Les enjeux du couple analyse statistique des données/modélisation mathématique sont d'abord de comprendre des systèmes de plus en plus complexes et non-linéaires afin de donner du sens aux observations expérimentales caractérisées par des masses de données importantes et forcément incomplètes. Le développement de l'interface avec les sciences du vivant est très rapide avec de nombreuses nouvelles équipes investies. On peut penser que dans un futur proche, l'objectif sera aussi d'essayer de prédire (médecine personnalisée par exemple) et de contrôler ces systèmes (biologie synthétique par exemple), en particulier dans leurs fonctionnements pathologiques (réchauffement climatique par exemple).

## INTERFACE AVEC LA PHYSIQUE

L'activité à cette interface est en plein essor. De nombreux biologistes se tournent vers les physiciens pour modéliser leurs systèmes, en même temps que de nombreux physiciens sont attirés par les enjeux de la biologie. Ces derniers amènent un bagage de savoir faire dans l'étude de « systèmes complexes » de toutes natures. En particulier, la physique théorique s'appuie sur la formalisation mathématique, l'utilisation assez systématique d'outils analytiques et de méthodes d'approximations, et le calcul numérique ou la simulation. Par la généralité de ces outils, les physiciens ont pu s'impliquer dans les sciences du vivant, dès lors que la modélisation apparaît possible et pertinente.

La question centrale des systèmes complexes peut se résumer ainsi : comment la connaissance des composants élémentaires ainsi que de leurs interactions permet-elle de comprendre et prédire le comportement collectif complexe émergent du système associé ? Les systèmes biologiques intègrent cette problématique : on connaît assez bien les constituants cellulaires (ADN, ARN, protéines, lipides, métabolites etc.) dans une cellule vivante, et un peu moins bien leurs interactions, mais on est encore très loin de comprendre comment fonctionne une cellule. De même, on peut se demander comment les comportements d'individus simples conduisent à une société animale organisée (fourmis, abeilles, poissons). Et comment de tels systèmes s'adaptent-ils à leur environnement ? Le grand défi de la biologie est de comprendre la relation entre organisation des constituants « élémentaires » et les différentes fonctions biologiques, de l'échelle moléculaire à celle de l'écosystème, en passant par la cellule, l'organe et l'organisme. L'intégration de multiples échelles spatiales et temporelles est un point commun important entre la physique et la biologie. De ce fait, nous nous attendons à une implication croissante des physiciens en biologie intégrative.

Le rôle des échelles spatiales est un fil conducteur pour beaucoup des recherches à l'interface physique-biologie. Ainsi à l'échelle cellulaire et en dessous, l'agitation moléculaire peut rarement être ignorée ; la physique statistique (équilibre et hors équilibre) est alors un cadre approprié pour comprendre de nombreux processus moléculaires (cf. travaux sur molécules uniques) et cellulaires (du transport actif à l'expression génétique stochastique en passant par l'auto-assemblage de complexes supramoléculaires). La physico-chimie aussi joue un grand rôle à cette échelle. En allant vers les échelles spatiales plus grandes, pertinentes par exemple pour les tissus, on passe progressivement d'un domaine stochastique à un domaine relativement déterministe, rejoignant la physique des milieux continus, et en particulier des problématiques relevant de la mécanique et la biomécanique. Les travaux actuels de modélisation en biomécanique

visent à décrire comment les objets biologiques s'organisent, fonctionnent et évoluent, en interaction avec leur environnement physiologique et physiopathologique. Pour décrire des processus comme l'angiogenèse, le remodelage osseux ou l'embryogenèse, il est indispensable de comprendre l'interaction entre les forces mécaniques développées par la cellule et la réorganisation de son cytosquelette et de ses points d'ancrage. Ces problématiques nécessitent des modèles couplant des champs physiques macroscopiques (écoulement de fluide, contrainte mécanique, diffusion de chaleur ou de matière...) à des systèmes biologiques complexes (cellules, tissus, organes). La mécano-transduction joue un rôle fondamental dans ces modèles. Elle permet à un système biologique de délivrer une information sur son environnement ou sur lui-même et de modifier ses propriétés sous l'action de contraintes physico-chimiques ou mécaniques diverses.

De façon générale, on peut dire que la modélisation, qui vise à donner un cadre synthétique et prédictif à des données ou des expériences, fait bien souvent appel aux nombreux outils et concepts de la physique, dont la physique statistique (à l'équilibre ou hors équilibre), la matière molle (polymères, gels, membranes, solutions), la physique non-linéaire, et la mécanique. Au-delà d'une description qualitative des interactions, la biologie va de plus en plus vers des données quantitatives, un cadre qui fait partie intégrante de la culture des physiciens. En retour, ces modèles sont susceptibles de proposer de nouvelles pistes expérimentales aux biologistes. Mais en biologie, les systèmes évoluent avec le temps et sont caractérisés par une grande variabilité. L'objet d'étude n'est donc jamais parfaitement défini, ni parfaitement reproductible. Par ailleurs, il existe peu de « lois » en biologie et beaucoup d'exceptions. Le physicien doit faire en sorte que les cadres conceptuels qu'il définit prennent en compte cette diversité.

Une autre face majeure de l'interface physique/biologie concerne les techniques expérimentales et les technologies ou capteurs pour la biologie développés par les physiciens (voir

par exemple la partie imagerie biologique ci-dessus). Ces techniques de pointe fournissent une masse de données quantitatives sans cesse croissante et le traitement de ces données exige des algorithmes particulièrement sophistiqués (segmentation d'image et suivi de traceurs étant deux exemples récurrents). L'interface physique/biologie se joue ici à la fois du côté « hardware » et du côté « software ». La grande diversité des techniques d'acquisition de données fait que celles-ci relèvent généralement de commissions spécialisées. Mais l'aspect software au sens large, qui requiert à la fois des modèles et des algorithmes innovants, est très clairement inscrit dans la CID43.

## CONCEPTS ET MÉTHODES INFORMATIQUES

Les progrès fulgurants des techniques d'acquisition expérimentale des données biologiques permettent d'accéder à des données de plus en plus massives, de plus en plus diverses, de plus en plus fiables, et de moins en moins coûteuses. L'avènement de ces nouvelles technologies devrait apporter aux biologistes des réponses à la fois plus précises et plus globales qu'auparavant. Cependant, fournir les méthodes permettant de traiter et analyser ces données pléthoriques pour aider à répondre aux questions biologiques est un véritable défi informatique.

Globalement, l'informatique doit fournir, en étroite collaboration avec les autres disciplines, les concepts nouveaux pour les approches multi-échelles, multi-niveaux, ou systémiques. Il s'agit d'étudier non plus les objets indépendamment les uns des autres, mais dans leurs interactions, et produire les méthodes pour aider à comprendre comment le comportement du système émerge de ces interactions.

La recherche en informatique pour la biologie est confrontée aux écueils liés à toute démarche de modélisation en sciences : la

complexité des problèmes fait que tout modèle prenant en compte l'ensemble des paramètres connus sera pratiquement inutilisable. Du point de vue de l'informatique, cette notion se traduit d'abord en termes de complexité algorithmique. Les problèmes algorithmiques posés par la biologie sont, dans l'immense majorité des cas, NP-difficiles dès lors que la modélisation tient compte de tous les paramètres « réalistes » connus. Une difficulté majeure réside dans la recherche d'un bon compromis entre la précision de la modélisation et la complexité algorithmique de sa résolution. L'étude fine de la complexité du problème considéré en fonction des différents paramètres (complexité paramétrique) et/ou celle de son approximabilité, sont des préalables importants à la réalisation d'algorithmes ou d'heuristiques les plus précis et rapides possibles. Simplifier la modélisation initiale en relâchant ou omettant certains paramètres peut amener à un problème plus aisément soluble, typiquement polynomial. Cependant la simplification du modèle ne doit jamais perdre de vue l'impératif de réalisme biologique. Les problèmes théoriquement plus faciles, pour lesquels des algorithmes polynomiaux existent (la recherche de séquences dans les banques par exemple) motivent également des recherches poussées pour passer à l'échelle (parallélisme massif, programmation sur circuits programmables (FPGA) ou cartes graphiques (GPU), structures d'indexation sophistiquées, par exemple).

Une autre difficulté réside dans le caractère hétérogène, changeant, parfois peu fiable voire contradictoire selon les différentes sources, des données biologiques que l'informatique doit traiter. Les banques de données biologiques sont en constante évolution et il est impossible d'en contrôler la fiabilité. Les résultats expérimentaux sont toujours sujets à une marge d'erreur qu'il est parfois difficile d'évaluer. Les méthodes informatiques doivent impérativement tenir compte de ce fait, en étant d'une grande robustesse et adaptables à l'évolution des données.

Un axe essentiel de la recherche en informatique pour la biologie est l'algorithmique des séquences, des graphes et des structures

discrètes en général. Ce champ de recherches fait face à de nouvelles problématiques liées au séquençage à haut-débit et au développement d'approches comparatives à très grande échelle pour l'étude du vivant à la lumière de l'évolution. Il est plus que jamais nécessaire de concevoir des algorithmes de traitement d'analyse non seulement des séquences, mais de données complexes qui soient efficaces, précis, robustes et passant à l'échelle des données massives. L'algorithmique des graphes est incontournable dès que l'on s'intéresse à la structuration de l'information génomique et aux relations entre les données biologiques. La biologie des systèmes, la biologie synthétique, la biologie structurale, la phylogénie notamment, sont des champs dans lesquels de véritables défis sont posés en termes d'algorithmique des graphes.

La classification et l'apprentissage automatiques constituent un autre domaine clé dont les applications sont nombreuses en bioinformatique (classification et annotation des transcrits issus d'expériences à haut-débit, classification de gènes selon leurs profils d'expression, apprentissage pour l'annotation automatique et pour la prédiction de structures moléculaires et de leurs interactions, par exemple). Ce domaine est en lien étroit avec la statistique et la modélisation probabiliste (modèles de Markov et Markov cachés, réseaux bayésiens, tests multiples, par exemple), et avec la théorie des langages pour certains aspects (grammaires stochastiques). Dans ce domaine il y a pléthore de données, ce qui est un avantage ; mais il y a aussi pléthore de paramètres, et souvent peu de données réellement fiables (c'est-à-dire avérées expérimentalement) sur lesquels les méthodes d'apprentissage peuvent se baser.

Plus généralement, le développement de méthodes pour enchaîner les étapes d'analyse à grande échelle des processus biologiques nécessite de continuer à développer des recherches dans d'autres domaines clés tels que la manipulation et l'intégration de données massives, complexes et hétérogènes, le calcul distribué et massif, l'analyse d'images et la géométrie computationnelle, la modélisation formelle de systèmes dynamiques, la visualisation.

Finalement, une particularité de la recherche en informatique pour la biologie est qu'elle nécessite une réelle intrication de tous les domaines de la discipline, allant des plus théoriques, touchant les mathématiques, jusqu'aux domaines les plus proches du « hardware », en passant par la gestion des données et des connaissances ou l'algorithme.

## ÉTAT DES LIEUX

Une étude bibliométrique rapide (1) permet de positionner les recherches se faisant en France dans ces domaines. En matière de publications en bioinformatique (2), la France se place en 4<sup>e</sup> position (~ 210 publications), très loin derrière les USA (~ 1 660), mais aussi assez loin derrière l'Allemagne (~ 450) et l'Angleterre (~ 390), deux pays qui ont fortement investi le domaine depuis une bonne dizaine d'année, et qui bénéficient de la présence de laboratoires Européens. La France devance légèrement la Chine (~ 180, en progression rapide), le Japon (~ 150) et le Canada (~ 150). Pour ce qui concerne les publications en biologie des systèmes (3), la France (~ 60) est moins bien placée, loin derrière les USA (~ 520), l'Angleterre (~ 200), le Japon (~ 170) et l'Allemagne (~ 140), et à quasi-égalité avec l'Italie, l'Espagne, la Chine et le Canada (entre 60 et 70 tous les quatre). On peut voir dans ces chiffres la conséquence d'une certaine inertie ; la biologie des systèmes est depuis quelques années largement mise en avant au niveau mondial, mais la France n'a pour l'instant fait que peu d'efforts en termes de financement (un appel ANR plutôt restrictif depuis 2006, rien auparavant). Ce même facteur (avec un décalage d'une dizaine d'années ; aucun appel ANR spécifique) explique sans doute aussi les résultats seulement honorables en bioinformatique, par comparaison avec l'Allemagne par exemple.

Une autre mesure simple est la présence du thème bioinformatique dans les laboratoires

du CNRS, telle qu'on peut la trouver dans l'annuaire des laboratoires sur le site du CNRS. En INSB 53 laboratoires sur 274 sont fléchés bioinformatique, en INEE 12 sur 80, tandis qu'on en trouve 5 sur 47 en INS2I, 1 en INC et aucun ailleurs. Même s'il ne s'agit pas d'une mesure réelle de l'activité, cela montre que les sciences de la vie au sens large ont bien compris l'intérêt de ces approches, mais que les mathématiques et l'informatique n'y ont encore mis que peu de forces. Il est également significatif que le thème biologie des systèmes (ou tout autre équivalent) n'apparaisse tout simplement pas sur le site. Enfin, on trouve difficilement 10 laboratoires (sur 1048) dont le nom évoque directement la bioinformatique ou la modélisation des systèmes biologiques, alors que de tels laboratoires existent en grand nombre à l'étranger. Ceci montre, si besoin, que l'effort vers l'interdisciplinarité que constitue la CID43 doit absolument se poursuivre et s'intensifier.

Sur la période 2003-2009 (7 ans donc), la CID43 (anciennement CID44) a assuré le recrutement (ou promotion CR1-DR2) de 39 chercheurs (+ 10 espérés en 2010). La pression était très forte, puisque nous avons auditionné près de 1000 candidats. Quelques autres recrutements sur les thèmes de la CID43 ont été faits dans d'autres sections (05, 07, 21, 22, 29 par exemple), mais avec généralement un caractère interdisciplinaire moins marqué. Notamment, ont été recrutés dans les sections de biologie des chercheurs appliquant des méthodes et programmes bioinformatiques, plutôt que contribuant à les faire progresser. Dans le même temps, de nombreux postes de bioinformatiques ont été affichés dans les Universités, pour répondre au besoin d'enseignements dans ces disciplines devenues indispensables à la biologie d'aujourd'hui. Ce bon niveau général de recrutement n'a malheureusement pas toujours été accompagné de la création de fortes équipes ou laboratoires, si bien que certains enseignant-chercheurs sont parfois isolés en ce qui concerne les aspects interdisciplinaires (ça n'est généralement pas le cas pour les recrutements CNRS et CID43, où cet aspect est pris en compte lors des concours).

## RECOMMANDATIONS

On peut retenir des grands axes présentés ci-dessus quelques mots clefs : génomique comparative et fonctionnelle, biologie structurale, réseaux et systèmes biologiques, biologie intégrative, environnement et biodiversité, dont le développement dans les années à venir nécessitera à l'évidence des développements spécifiques en modélisation mathématique et physique, en statistique, en algorithmique, en imagerie, et en bases de données et de connaissances. Pour mener à bien ce programme, maintenir des recherches de premier plan en France, et développer harmonieusement cette interdisciplinarité au sein du CNRS, il importe de mettre en œuvre les recommandations suivantes :

*Il faut accentuer les efforts en terme de postes interdisciplinaires*, avec l'objectif de combiner au mieux : (1) réponses aux grandes questions de la biologie et au développement des approches à grande échelle ; (2) avancées des travaux méthodologiques, car ceux-ci accompagnent (voire précèdent) les progrès en biologie, et présentent souvent un intérêt propre dans leur discipline d'origine. Ces postes devraient principalement relever d'une section interdisciplinaire (de type CID43, pour assurer l'intérêt sur les deux versants), mais aussi des sections disciplinaires, et aller vers l'ensemble des instituts concernés (INSB, mais aussi INS2I, INSMI, INP, INEE...).

*Il est indispensable que ces postes soient ouverts* pour la plupart, et ne souffrent pas de fléchages ou coloriages trop contraignants. C'est particulièrement important dans l'interdisciplinarité où les viviers sont parfois restreints. Si le CNRS et les instituts souhaitent faire avancer une politique scientifique particulière, il faut que les fléchages soient connus longtemps à l'avance, de manière à ce que les laboratoires aient le temps d'attirer des candidats de valeur.

*Les recrutements doivent largement se faire au niveau CR2*. L'interdisciplinarité de la CID43 est déjà bien établie, et on trouve

d'excellents candidats, jeunes et ayant une réelle double compétence entre sciences formelles et biologie. Le niveau CR1 doit typiquement être ouvert et sans fléchage (cf. ci-dessus), pour recruter des chercheurs particulièrement brillants et ayant déjà un solide bagage, une vraie autonomie et une activité interdisciplinaire indiscutable.

*Il faut repenser le suivi des chercheurs recrutés par la CID43* (le problème est sans doute analogue dans les autres CID). Ceux-ci sont à l'interface de plusieurs disciplines, mais l'évolution de leur carrière dépend de sections spécialisées qui leur préfèrent souvent des chercheurs davantage centrés sur le cœur de leur discipline. Il faut donc que la CID43 soit étroitement associée aux évaluations de ces chercheurs, en partenariat avec les sections dont ils dépendent directement.

*Un objectif majeur est de développer les équipes ou laboratoires clairement situés à l'interface*. Si ceux-ci commencent à voir le jour sur le versant biologique, ils sont forts rares sur le versant méthodologique (cf. l'état des lieux ci-dessus). À ce titre, une politique incitative doit être mise en place (relancée, car des efforts avaient été faits au tournant des années 2000), au travers de programmes CNRS, mais aussi de l'ANR qui s'est jusqu'à maintenant montrée peu interdisciplinaire. La gestion du suivi des chercheurs recrutés par la CID43 doit s'étendre à ces équipes et laboratoires interdisciplinaires.

*Il faut développer l'activité de services en bioinformatique et en biostatistique*, qui est indispensable aux biologistes à l'heure des données « haut-débit ». Pour être performante, cette activité doit absolument être adossée à la recherche. En retour, la recherche bénéficie de services performants, par exemple lorsqu'il s'agit de récupérer des données ou de mesurer les progrès apportés par telle ou telle méthode. Une bonne part de l'interface entre biologistes et chercheurs en modélisation et bioinformatique, passe par les plateformes de services que ce soit pour l'acquisition et la gestion des données, ou les calculs de plus en plus lourds impliqués par le volume des données et la sophistication des méthodes. Le développement de cette activité implique

essentiellement des recrutements d'ITA, qui stabiliseront et amplifieront les services aujourd'hui assurés par des CDD en nombre toujours croissant. L'adossement à la recherche

et au développement permettra à ces ITA de rester performants et par conséquent d'accompagner la recherche en la faisant bénéficier des dernières avancées.

## GLOSSAIRE

AFM	Atomic force microscopy
CLEM	Correlative Light Electron Microscopy
cryoEM	Electron cryomicroscopy
FCS	Fluorescence Correlation Spectroscopy
FPGA	Field Programmable Gate Array
FLIM	Fluorescence Lifetime Imaging microscopy
FRET	Förster Resonance Energy Transfer

GPU	Graphics processing unit
Nipkow	Disk CLSM Nipkow disk Confocal Laser Scanning Microscopy
TAP/MS	Tandem Affinity Purification/Mass Spectrometry
SAXS	Small Angle X-rays Scattering
SIM	Structured Illumination Microscopy
STED	Stimulated Emission Depletion
TIRF	Total Internal Reflection Fluorescence

### Notes

(1) Web of Science de l'ISI, période 2005-2009, nombre d'articles dont au moins un auteur est dans le pays considéré (les résultats sont très proches en considérant des périodes plus larges ou plus restreintes, sauf pour la Chine qui accélère nettement dans la période récente).

(2) Publications dans la revue *Bioinformatics* (Oxford University Press) qui est la plus ancienne et a le facteur d'impact le

plus élevé ; des résultats similaires sont obtenus avec d'autres revues comme *BMC Bioinformatics* ou *PLOS Computational Biology*.

(3) Publications dans *Biosystems*, *Molecular Biosystems*, *Systems Biology*, *Molecular Systems Biology*.

# COGNITION, LANGAGE, TRAITEMENT DE L'INFORMATION, SYSTÈMES NATURELS ET ARTIFICIELS

## *Président*

Pierre ZWEIGENBAUM

## *Membres de la section*

Nathalie AUSSENAC-GILLES

Nicolas BALACHEFF

Muriel BOUCART

Francis CORBLIN

Henri COULAUD

Michel DE GLAS

Georges DI SCALA

Chantal ENGUEHARD

Inès GALLAY

Vincent HAKIM

Christophe JOUFFRAIS

Louis LEVY GARBOUA

Marion LUYAT

Bernard MAZOYER

Sylvie MELLET

Marie-Noëlle METZ-LUTZ

Isidora STOJANOVIC

Laurence TACONNAT

Simon THORPE

## 1 – INTRODUCTION

À l'heure où la séparation du CNRS en 10 instituts se poursuit, la question de l'avenir des domaines de recherche interdisciplinaire est devenue un enjeu primordial. En effet, pour assumer son rôle de pilotage, il est vital que le CNRS puisse avoir une politique cohérente pour les domaines de recherche à l'interface entre plusieurs instituts. Le cas des sciences cognitives, qui sont au centre des préoccupations de la CID 44, est un exemple particulièrement évident d'un domaine essentiel qui ne peut être traité ni par un seul institut du CNRS, ni par un autre organisme de recherche national. En effet, les sciences cognitives intéressent au moins 6 des 10 instituts du CNRS.

Globalement, le champ de recherche qui intéresse la CID 44 concerne l'étude des systèmes intelligents, qu'ils soient naturels ou artificiels. Pour ce qui est des systèmes naturels, il s'agit d'étudier l'intelligence à tous les niveaux, des organismes dotés de systèmes nerveux relativement simples, jusqu'à l'homme vu au niveau individuel, ou en société. Pour cela, il est nécessaire de faire appel à de très nombreuses disciplines. Certaines, comme les neurosciences et l'étude du comportement animal (l'éthologie) font partie des domaines centraux

de l'INSB (Sciences Biologiques). D'autres, comme la linguistique, les sciences de langage, la philosophie, la sociologie, et les sciences de l'éducation relèvent de l'INSHS (Sciences de l'Homme et de la Société). Signalons la place particulièrement critique de la psychologie, qui est véritablement à la frontière entre l'INSB et l'INSHS. En ce qui concerne l'intelligence vue du côté des systèmes artificiels, il va de soi qu'un domaine comme l'informatique va intéresser directement l'INS2I (Sciences Informatiques et leurs Interactions) mais également l'INSIS (Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes) dans lequel se retrouvent les recherches en robotique. Les outils mathématiques peuvent être sollicités pour assister et modéliser les recherches sur l'intelligence des systèmes naturels et des systèmes artificiels ce qui explique la pertinence de l'INSMI (Sciences Mathématiques et leurs Interactions) pour la CID 44. Enfin, notons qu'en plus de ces 5 instituts, plusieurs chercheurs en Physique dépendant de l'INP ont apporté des contributions très importantes dans divers domaines de recherche, plus particulièrement celui de l'étude des systèmes neuromimétiques.

## **2 – LA CID 44 ET LES SECTIONS DU COMITÉ NATIONAL**

À cause de cette grande diversité de rattachements institutionnels, les activités de la CID44 relèvent d'un nombre impressionnant de sections du comité national. Six des 40 sections du Comité National sont officiellement reconnues comme étant directement concernées par la CID 44. Il s'agit de la section 01 (Mathématiques et interactions des mathématiques), la section 07 (Sciences et technologies de l'information (informatique, automatique, signal et communication)), la section 27 (Comportement, Cognition, Cerveau), la section 34 (Langues, langage, discours), la section 36

(Sociologie – Normes et règles), et enfin la section 40 (Politique, pouvoir, organisation).

Mais les domaines directement liés aux activités de la CID 44 concernent au moins six autres sections. Tout d'abord, la section 02 (Théories physiques : méthodes, modèles et applications). Ensuite, la section 09 (Ingénierie des matériaux et des structures – Mécanique des solides – Acoustique), qui inclut une composante importante concernant l'acoustique et la perception auditive, particulièrement pertinente pour la CID44. Certaines études en neurosciences peuvent également impliquer des chercheurs en biologie qui ne font pas partie de la section 27, mais relèvent des sections 24 (Interactions cellulaires), et 25 (Physiologie moléculaire et intégrative). Une autre section qui logiquement a toute sa place au sein de la CID 44 est la section 35 (Philosophie, histoire de la pensée, sciences des textes, théorie et histoire des littératures et des arts), surtout lorsqu'il s'agit de questions relevant de la philosophie de l'esprit. Enfin, certains domaines comme l'étude des mécanismes de prise de décisions et ce que l'on peut appeler la neuroéconomie relèvent également de la section 37 (Économie et gestion). Cette diversité est bien représentée au sein de la CID 44 qui comporte parmi ses membres, outre des chercheurs des sections 7, 27 et 34, des chercheurs des sections 02, 35, et 37.

Si les sciences cognitives impliquent des chercheurs appartenant à de très nombreuses sections du comité national, et au moins six des 10 instituts du CNRS, il ne faut pas conclure qu'il s'agit d'une simple juxtaposition de tous ces thèmes de recherches. Pour faire partie de la communauté des sciences cognitives, il faut que la recherche adresse d'une manière ou d'une autre l'une des grandes fonctions fondamentales de la cognition, telle que la perception (vision, audition, olfaction, gustation, somesthésie), le contrôle moteur, la mémoire, l'attention, la prise de décision, l'émotion, l'intelligence, la compréhension, le raisonnement, la communication, ou même la conscience. Vu sous cet angle, il devient clair que même en neurosciences, une partie très conséquente des recherches ne doit pas être assimilée aux scien-

ces cognitives. Il va de soi que ceci est également le cas en ce qui concerne les mathématiques, la physique, l'informatique ainsi que plusieurs disciplines des sciences humaines et sociales.

### 3 – PANORAMA DES SCIENCES COGNITIVES EN FRANCE

En prenant une définition assez stricte des sciences cognitives, et à partir des informations de Labintel, on peut recenser au moins 107 structures de recherches CNRS travaillant dans des domaines qui relèvent de la CID. Ces structures, dont 67 UMR, 6 FRE, 12 GDR, 10 IFR et 4 UPR, sont dans leur très grande majorité associées à plusieurs sections et Instituts. Les sections d'affectation principalement concernées sont, par ordre de fréquence, la section 27 (60 structures), la section 34 (34 structures), la section 07 (31 structures), la section 25 (19 structures), la section 9 (10 structures), et les sections 01, 02, 35 et 27 avec quelques laboratoires chacune. Sur le plan des instituts, 71 structures sont associées à l'INSB, 46 à l'INSHS, 38 à l'INSIS, 35 à l'INS2I, 17 à l'INP et 8 à l'INSMI (voir détails en annexe).

Si une partie importante de ces structures se trouve à Paris et en région Parisienne (environ 40%, comme la proportion en Île-de-France des unités CNRS toutes thématiques confondues), il existe d'importantes concentrations de chercheurs avec 10 structures à Aix-Marseille, 9 à Lyon, 8 à Toulouse, 6 à Grenoble, 5 à Bordeaux, 3 structures à Dijon, Montpellier, Nantes et Strasbourg, et deux à Caen, Nancy, Poitiers, Lille et Rennes. Enfin, on trouve également des structures travaillant en sciences cognitives à Clermont-Ferrand, Nice et Valenciennes.

Bien évidemment, le CNRS n'est pas le seul organisme concerné par les recherches en sciences cognitives. L'INRIA a également

un nombre très important d'équipes travaillant dans ce domaine, et ceci dans tous ses centres (Grenoble, Nancy, Rennes, Roquencourt, Sofia Antipolis...). Une quarantaine d'équipes travaillent sur la thématique « Perception, Cognition, Interaction », couvrant un nombre important de domaines spécialisés telles « Vision, Perception et interprétation multimédia », « Interaction et Visualisation », « Représentation et traitement des données et des connaissances », « Robotique » et « Langue, parole et audio ». Il existe également plusieurs équipes INRIA travaillant sur la thématique Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC), avec des applications visant spécifiquement la médecine et les neurosciences.

L'INSERM a également une activité importante dans l'étude des bases cérébrales de la cognition et leurs implications pour la santé notamment de par le nombre important de chercheurs CNRS qui travaillent dans des laboratoires INSERM sur ce domaine. Citons, par exemple, le Laboratoire de Neurosciences Cognitives, UMR-S ENS-INSERM, à l'ENS, le INSERM-CEA Cognitive Neuroimaging Unit à Saclay, le Stem Cell & Brain Research Institute (INSERM U846) à Lyon, et le laboratoire « Espace et Action » (INSERM U864), également à Lyon. D'autres laboratoires INSERM travaillant sur la cognition se trouvent dans des villes comme Bordeaux, Marseille, Strasbourg et Toulouse.

Des laboratoires du CEA (plus spécifiquement à Neurospin, et à Caen) ou de l'INRA accueillent également des chercheurs en sciences cognitives. Et, en dehors des EPST, il existe plusieurs centres universitaires où ce domaine de recherche est bien implanté comme, par exemple, l'équipe COSTECH à l'IUT de Compiègne, l'équipe TechCICO de l'université de Troyes, le Laboratoire d'Automatique Humaine et de Sciences Comportementale (LASC) à Metz, et l'Unité de Recherche en sciences Cognitives et Affectives (URECA) à Lille, pour ne citer que quelques exemples.

Si de nombreux organismes de recherche et universités sont actifs dans le domaine des sciences cognitives, il est clair que seul le CNRS

peut avoir la vision d'ensemble, regroupant toutes les indispensables composantes. Pour cette raison, dans l'éventualité de la mise en place d'une structure nationale avec vocation de piloter les recherches dans le domaine, le CNRS semble le seul EPST pouvant réellement jouer un rôle pilote.

## 4 - LES ENJEUX

Quels sont les enjeux des recherches interdisciplinaires en sciences cognitives et plus généralement dans l'étude des systèmes intelligents? Globalement, on peut différencier trois axes: (1) Innovation technologique, (2) Santé, autonomie, qualité de vie, et (3) Éducation.

### 4.1 INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Le statut de la France comme générateur de technologies innovantes dépendra sans doute de sa capacité à produire des systèmes informatiques dotés de fonctions intelligentes, telles que la capacité d'interagir avec des utilisateurs de façon naturelle. Dans un monde peuplé d'ordinateurs, de smart-phones et de terminaux de toutes sortes, l'avenir appartiendrait à ceux qui peuvent exploiter ce type de technologie de façon optimale. Historiquement, la France a su innover: citons par exemple l'introduction du Minitel dès 1980 qui a permis à la France d'avoir une véritable longueur d'avance technologique par rapport à ses concurrents. Or, l'arrivée de l'internet a complètement bouleversé la donne, et aujourd'hui, il faut admettre que l'essentiel des innovations technologiques est réalisé à l'étranger. Mais cette situation n'est pas obligatoire. La France possède une très grande culture en ingénierie et en informatique, avec un potentiel important pour la fabrication des composants électroniques. Pour pouvoir compter

dans le monde technologique de demain, il va falloir être capable de développer des systèmes dotés d'intelligence, et pour cela, il faut réaliser un effort très important pour susciter de fructueuses collaborations entre chercheurs venant d'horizons différents.

La vision constitue un autre domaine où la recherche sur les mécanismes biologiques pourrait contribuer de façon bien plus importante aux développements technologiques. Au début des années 80, David Marr avait déjà proposé que la vision, qu'elle soit naturelle ou artificielle, soit étudiée comme une discipline commune. En effet, les problèmes posés pour ces systèmes de vision sont quasi-identiques: le système doit pouvoir détecter, identifier et localiser des objets importants dans des scènes naturelles complexes avec une fiabilité et une rapidité optimales. Surtout, il faut réaliser ces performances avec un coût énergétique, un poids et un espace physique minimal. Le monde des systèmes visuels biologiques regorge de systèmes visuels hyper-optimisés qui pourraient servir de modèles pour les ingénieurs. C'est une approche qui a été particulièrement développée en France, avec les travaux pionniers de chercheurs comme Nicolas Franceschini, qui a quasiment inventé ce que l'on peut appeler la biorobotique.

En effet, la robotique constitue un autre domaine riche en potentiel pour une recherche interdisciplinaire productive. Fabriquer des machines capables de réaliser des gestes avec la précision et la fiabilité d'un être humain reste toujours un vieux rêve. Des progrès dans ce domaine, ainsi que dans le développement des systèmes de navigation et de décision embarqués (ce que l'on peut appeler « cognition située ») trouveraient un nouvel essor grâce à une recherche interdisciplinaire de haut niveau.

### 4.2 SANTÉ, AUTONOMIE, QUALITÉ DE VIE

Les recherches en sciences et technologies cognitives ont un impact sociétal impor-

tant, aussi bien dans le domaine du vieillissement que celui des déficiences sensorielles, motrices ou cognitives. Le nombre de personnes vivant avec de telles déficiences est d'ailleurs très corrélé avec l'augmentation de l'âge de la population. Les recherches en sciences et technologies cognitives ont pour objectif social de favoriser l'inclusion et l'autonomie des personnes et donc leur qualité de vie, quels que soient la déficience ou le handicap que ces personnes présentent.

Plusieurs groupes de chercheurs interdisciplinaires travaillent sur la caractérisation de ces déficiences ainsi que sur la définition des besoins des personnes et sur la conception de technologies de rééducation, d'assistance ou de suppléance.

À titre d'exemples, nous pouvons citer, pour chaque type de déficience, des recherches illustrant ces différentes approches.

Il y a en France des équipes reconnues dans le domaine des déficiences auditives. Celles-ci couvrent un empan large, incluant les recherches portant sur les bases neurales du codage auditif en étroite collaboration avec les médecins ORL, les informaticiens et les industriels proposant des implants cochléaires. Cette approche a donné lieu à des systèmes qui ont déjà fait leurs preuves, mais qui deviendront encore plus performants grâce à l'approche interdisciplinaire. D'autres recherches portant sur la communication assistée se focalisent sur les technologies qui permettent d'améliorer l'inclusion et l'autonomie des sourds en améliorant la place attribuée à la langue des signes, à son instrumentation informatique, à sa diffusion et à la possibilité de l'utiliser dans l'éducation et dans les actes de la vie quotidienne.

Il existe des exemples similaires dans le domaine des déficiences visuelles, avec des équipes qui travaillent sur les interfaces neurales qui, une fois implantées dans le système visuel, permettent de restaurer certaines fonctions visuelles (les neuroprothèses visuelles). Nous pouvons ici aussi citer des exemples de recherches portant sur les technologies d'assistance qui visent à équiper des non-voyants

avec un dispositif embarqué de vision artificielle (caméras miniaturisées et traitement d'image) et dont l'objectif consiste à restaurer par réalité augmentée ou substitution sensorielle la perception de l'environnement.

Dans le domaine moteur, des équipes reconnues travaillent sur les interfaces neurales (périphériques ou centrales, implantées ou de surface) et leurs applications, ainsi que sur les technologies d'assistance (claviers virtuels, robotique, etc.). Tous ces projets ont pour objectif d'améliorer la communication ou la mobilité et donc l'insertion des déficients moteurs.

Dans le domaine des pathologies cognitives enfin, plusieurs projets ont pour objectif de caractériser les substrats et les processus neuraux sous-jacents, mais aussi de concevoir et utiliser des outils de remédiation basés sur des technologies de l'information et de la communication et notamment la réalité virtuelle.

Ces recherches en suppléance, dont nous venons de donner quelques exemples, reposent sur un équipement embarqué par ou dédié à l'utilisateur. Or, la recherche sur l'intelligence ambiante se développe aujourd'hui très rapidement. Le domaine de la santé et de l'autonomie constitue un champ d'application particulièrement fécond pour les systèmes ambiants. Les personnes déficientes sont immergées dans un environnement interactif constitué de capteurs et d'entités de traitement intelligent des données, capables de détecter et d'interpréter des événements (une chute par exemple, mais aussi le désir d'effectuer une action), d'assister la personne dans sa vie courante (domotique, robotique d'assistance) mais aussi de suivre son évolution à long terme (perte progressive de mobilité par exemple), de faciliter la mise en œuvre de services et l'accès à des données telles que les prescriptions, les visites prévues, etc. Les différents personnels d'assistance ou de soin qui interviennent au domicile ont également vocation à être équipés de dispositifs mobiles qui interagissent de manière contextuelle avec le système ambiant du domicile.

Toutes ces recherches ont pour objectif d'améliorer l'inclusion et la qualité de vie des

personnes déficientes. Elles peuvent aussi être déployées dans un domaine connexe, celui de la santé et avoir pour objectif d'améliorer tous les aspects de la prise en charge des patients (sécurité, information, suivi, maintien à domicile, hospitalisation à domicile, etc.) ainsi que de concevoir des outils innovants au service des médecins (diagnostic, rééducation, chirurgie assistée, etc.). Plusieurs laboratoires français développent actuellement des simulateurs et des environnements expérimentaux permettant de concevoir et d'évaluer ces nouvelles technologies qui permettent de réparer, assister ou augmenter le corps et le cerveau humains.

Toutes ces recherches impliquent de nombreuses disciplines comme les neurosciences et la psychologie cognitive évidemment, mais aussi la médecine, l'informatique (dont plusieurs sous-disciplines telles que l'interaction homme-machine, les réalités virtuelle et augmentée, le traitement de l'image, le traitement automatique des langues, les systèmes multi-agents, etc.), l'ergonomie cognitive, la sociologie, la robotique et les nanotechnologies.

Il est important de mettre en évidence l'intérêt des technologies cognitives émergentes dans le cadre de la rééducation, de l'assistance ou de la suppléance. Il faut cependant aussi noter que l'usage de ces technologies ouvre de nouvelles questions sur la cognition médiée par ces technologies.

### 4.3 ÉDUCATION

La demande de technologies pour l'éducation, la formation, et plus largement l'apprentissage humain sous toutes ses formes s'est largement développée avec des exigences d'adaptabilité, de flexibilité et d'efficacité qui soulèvent des problèmes d'une grande diversité mais avec toujours à leur cœur la question des processus cognitifs en termes de conceptualisation, de construction du sens et d'acquisition de savoir-faire. Les principaux problèmes s'organisent autour de la question du passage des

modèles et des concepts des sciences cognitives à leur mise en œuvre dans des dispositifs informatiques, de la question d'ingénierie des situations permettant les apprentissages et d'évaluation de l'efficacité des technologies dans les divers contextes d'usage à l'école ou sur le lieu de travail, pour satisfaire des besoins privés ou professionnels, par des sujets aux compétences et aux besoins d'une grande diversité (de l'enfant à la personne âgée, sous la contrainte de handicaps ou de pathologies cognitives ou motrices).

La recherche dans ce domaine, organisée au sein de la thématique « environnements informatiques pour l'apprentissage humain » (EIAH), est par nature fortement pluridisciplinaire, impliquant divers secteurs de l'informatique (e.g. interfaces humain-machine, intelligence artificielle, génie logiciel) et des SHS (e.g. pédagogie, psychologie, didactique). Elle porte sur les principes de conception, de développement et d'évaluation d'environnements informatiques qui permettent à des êtres humains d'apprendre. Par sa dimension théorique, cette recherche est en amont d'une ingénierie, mais en interaction profonde avec elle dans sa dimension méthodologique. Elle requiert la construction et la validation de modèles computationnels de processus didactiques. Le caractère « didactique » tient à ce que chaque EIAH engage de fait une déclaration sur les objets ou les enjeux de l'apprentissage, d'une part, et, d'autre part, appelle la définition de moyens permettant de vérifier la réalisation des objectifs ainsi affichés. De plus l'apprentissage recherché doit être obtenu au terme d'une durée qui soit acceptable aux yeux de celui qui apprend et/ou de l'institution d'enseignement ou de formation, sous les contraintes économiques et technologiques du support choisi.

Ces problèmes à la fois technologiques, cognitifs et sociaux demandent que soient revuées bien des questions spécifiques de l'informatique : modélisation des connaissances, du raisonnement, de l'interaction, ergonomie des interfaces etc. L'une des raisons qui peut faire comprendre à quel point cette reprise de thèmes classiques doit être effectivement et activement conduite, c'est que l'utilisateur

d'un EIAH est dans une certaine mesure sous le contrôle de la machine – et non l'inverse – au sens où les savoirs et pratiques de références sont du côté du dispositif formateur. Bien sûr, celui qui apprend dispose de connaissances qui ont fait leurs preuves – y compris dans le domaine visé par l'apprentissage – mais la position d'apprenant signifie la recherche, voulue ou provoquée, d'une évolution de ces connaissances en acceptant la tutelle d'un « connaisseur » de référence (ce que la langue anglaise traduit assez bien par « a knowledgeable other »).

## 5 – LE RAPPORT PIRSTEC

Les domaines couverts par la CID 44 ont récemment fait l'objet de l'atelier de réflexion prospective PIRSTEC « Prospective Interdisciplinaire en Réseau pour les Sciences et Technologies Cognitives ». Cet atelier, sélectionné et financé par les Départements STIC, Biologie-Santé et SHS de l'ANR s'est déroulé entre octobre 2008 et fin 2009. Il a permis l'organisation d'une quarantaine de réunions de réflexion impliquant environ 1 200 participants. Ces activités ont été regroupées selon 6 grands axes chacun associés à une série de défis, détaillés dans le rapport final de l'atelier. Ici nous repreneons les éléments essentiels de ce rapport.

Le premier thème concerne les fonctions perceptives, cognitives et exécutives et soulève les quatre défis suivants. Défi n° 1 : Quels sont les mécanismes d'analyse et de segmentation des scènes perceptives, et les principes de contrôle des systèmes moteurs? Défi n° 2 – Comment se construisent les relations entre un organisme et son environnement? Comment sont sélectionnées et contrôlées les interactions perceptuo-motrices dans la boucle intégration-décision-prédiction? Comment sont-elles modulées par le contexte émotionnel, situationnel, motivationnel? Comment sont-elles investies par les mécanismes d'interaction sociale? Défi n° 3 – Quelles sont les

bases génétiques, neurobiologiques, cognitives du langage humain? Quelles sont les spécificités des mécanismes et des fonctions du langage? Défi n° 4 – Comment utilisons-nous nos capacités cognitives et langagières pour communiquer et interagir, et construire des systèmes interactifs adaptés?

La deuxième thématique va de la cognition individuelle à la cognition sociale et implique deux autres défis. Défi n° 5 – Peut-on faire dériver des capacités d'interactions sociales humaines de capacités cognitives individuelles ou de mécanismes d'interactions animales préexistants? Peut-on définir les bases cognitives et génétiques des pathologies de la cognition sociale? Défi n° 6 – Comment intégrer mécanismes cognitifs individuels et mécanismes d'interaction collective au sein de principes d'interaction sociale réalistes et de systèmes socio-techniques efficaces?

Le troisième thème concerne les substrats de la cognition, les neurosciences, la modélisation et les technologies et relève deux défis principaux. Défi n° 7 – Comment réaliser un système artificiel qui, à partir de compétences initiales simples, développe des capacités cognitives complexes en interagissant avec son environnement? Défi n° 8 – Le système nerveux étant un exemple réussi de substrat physique support de fonctions cognitives, comprendre ses constituants peut-il permettre de mieux comprendre les fondements de la cognition ou de développer d'autres systèmes physiques dont le fonctionnement soit compatible avec le substrat physiologique et sa cognition émergente? Les trois autres thématiques sont, a priori, plus liées aux enjeux sociétaux et économiques.

Ainsi, la quatrième thématique concerne les usages, les médiations techniques et l'ingénierie cognitive, et relève deux défis principaux. Défi n° 9 – Comment les technologies éclairent-elles et comment transforment-elles la cognition humaine? Comment fonctionnent les co-adaptations entre cognition et technologies? Défi n° 10 – Comment développer une démarche bien fondée en ingénierie pour des IHM complexes, adaptées aux architectures cognitives humaines, dans ses principes ou

dans ses usages? Comment mieux cerner les voies que les technologies nous ont véritablement ouvertes?

Le cinquième thème s'intéresse à la Santé et aux handicaps et plus spécifiquement aux technologies pour l'évaluation, le diagnostic, le pronostic et la remédiation. Deux défis de taille sont signalés. Défi n° 11 – Comment développer de nouveaux outils technologiques pour assister, réparer, augmenter le fonctionnement du corps et du cerveau? Défi n° 12 – Comment définir des outils, des systèmes, des modèles pour accompagner les handicaps cognitifs, du pronostic au diagnostic, de la remédiation (rééducation) à l'évaluation.

Enfin, dans le sixième thème qui concerne l'apprentissage, l'éducation et les technologies éducatives pose le Défi n° 13 – Comment définir des outils, des systèmes, des modèles pour apprendre autrement, pour apprendre mieux?

## 6 – LES SCIENCES COGNITIVES DANS LES INSTITUTS

### 6.1 INSB

L'INSB joue un rôle très significatif dans les sciences cognitives. Environ 70% des structures CNRS du domaine sont rattachées de façon principale ou secondaire à l'INSB, et jusqu'à récemment, c'était le département des Sciences de la Vie du CNRS qui pilotait la CID 44 (et sa version précédente, la CID 45) depuis sa création en 2003. La plupart des laboratoires en sciences de vie concernés par la CID 44 appartiennent à la section 27, où la quasi-totalité des unités travaillent dans le domaine des sciences cognitives, et plus spécifiquement les neurosciences intégrées et la psychologie. Un nombre important des laboratoires du domaine sont également associés à la sec-

tion 25, essentiellement des laboratoires de neurosciences. Vu cette densité importante, on pourrait imaginer que l'INSB puisse gérer sa propre recherche dans le domaine des sciences cognitives, en se focalisant sur l'interface entre Neurosciences et Psychologie. En effet, la section 27 a, depuis longtemps, réussi à développer cette interface importante. Or, il y a clairement de nombreuses situations où la recherche ne se limite pas à ce qui peut être piloté à l'intérieur de l'INSB. Citons quelques cas parmi les plus évidents.

**Recherche sur le langage.** Si les chercheurs travaillant sur le langage peuvent trouver une place au sein de la section 27, la frontière entre l'étude du langage vue de l'INSB et l'étude du langage vue de l'INSHS, et plus particulièrement au sein de la section 34 n'est pas nette. De nombreux chercheurs utilisent des méthodes expérimentales issues de la psychologie expérimentale et des neurosciences afin d'adresser des questions tout à fait pertinentes pour les sciences du langage.

**La modélisation informatique.** Depuis une vingtaine d'années, une discipline nouvelle s'est construite à l'interface entre informatique et neurosciences, discipline qui se retrouve sous l'appellation de neurosciences computationnelles. C'est un domaine en plein essor, en partie parce que les développements en informatique rendent faisables des simulations de très grande taille. Citons, par exemple, le projet SpiNNaker de l'Université de Manchester qui vise à relier entre eux des milliers de processeurs de type ARM (ceux que l'on trouve dans de très nombreuses technologies de style « Smartphone »). Avec ce système, le professeur Steve Furber croit pouvoir simuler jusqu'à un milliard de neurones de type « integrate and fire ». Vu que le néocortex humain dans sa totalité n'est composé que de 16 milliards de neurones environ, la possibilité de simuler réellement certains aspects de la complexité du système visuel est potentiellement à la portée des chercheurs dans un avenir pas si lointain.

**Traitement du signal.** Un autre domaine où les chercheurs en Neurosciences et Psychologie ont vraiment besoin d'une

approche interdisciplinaire est celui du développement des techniques d'étude et d'analyse par imagerie. Les progrès dans ce domaine ont été fulgurants depuis les premières études en tomographie par émission de positrons (TEP) à la fin des années 80, puis l'introduction de l'Imagerie par Résonance Magnétique pour l'étude de l'activation cérébrale (IRMf) dès 1992, et enfin les méthodes comme l'EEG et la MEG. La France est très bien placée sur le plan international, avec plusieurs centres d'imagerie de premier plan, comme Neurospin à Saclay et des centres d'imagerie à Bordeaux, Caen, Grenoble, Lyon, Marseille et Toulouse. Or, le développement de ce type de recherche exige une collaboration très poussée entre des ingénieurs, mathématiciens et physiciens, spécialistes du traitement du signal et du développement technique, et les chercheurs en neurosciences et en psychologie.

## 6.2 INSHS

L'INSHS est aussi l'un des instituts qui entre en forte interaction avec la CID 44. Rien d'étonnant à cela puisque la cognition est une des fonctions supérieures de l'homme à l'œuvre dans son développement personnel et social. Historiquement d'ailleurs, les sciences cognitives se sont structurées à partir de problématiques croisées entre la psychologie d'une part, la philosophie, les sciences du langage, la logique d'autre part – ces dernières relevant en tout ou en partie des SHS; l'informatique est très vite venue s'adjoindre à ce groupe initial, avant que la dynamique propre à ce nouveau domaine de recherche n'élargisse encore sa couverture interdisciplinaire. On parle désormais aussi d'anthropologie cognitive, d'économie cognitive, de cognition sociale (réseaux sociaux d'agents cognitifs), etc.

On ne saurait donc énumérer ici toutes les recherches qui, en SHS, ont un rapport avec les sciences cognitives et sont intéressées à pouvoir dialoguer avec une CID forte et bien reconnue. On se contentera donc d'évoquer quelques domaines particulièrement riches et

innovants, exemples parmi d'autres dans lesquels les sciences humaines et sociales, en interdisciplinarité interne et investissant de surcroît le champ cognitif, font la preuve de leur capacité à poser de nouveaux questionnements, à inventer de nouveaux modèles, à proposer de nouveaux paradigmes.

Ainsi un domaine dans lequel la complémentarité des sciences humaines et de la biologie s'est révélée particulièrement pertinente est celui du développement cognitif, des apprentissages et de la maturation cérébrale. Plusieurs études américaines récentes associant des sociologues, des psychologues et des neurobiologistes ont démontré l'impact de l'environnement socio-économique non seulement sur le développement cognitif mais aussi sur la maturation cérébrale et la spécialisation fonctionnelle.

Il convient de mentionner aussi les nombreuses recherches de pointe qui touchent au langage. Le lien entre la compétence linguistique et ses bases neuronales fait l'objet de recherches qui prennent pour objet des capacités de plus en plus élaborées en syntaxe et sémantique. La plausibilité des modélisations neuronales est considérée dans certains travaux comme un moyen de décider entre des théories linguistiques concurrentes. Inversement, les progrès récents de la sémantique concurrentielle, en appui sur le traitement quantitatif de très grands corpus numérisés, apportent de nouvelles données et de nouveaux arguments dans le débat autour des différents modèles neuronaux d'activation sémantique. Les relations entre psychologie expérimentale et recherche fondamentale en linguistique ont aussi connu des développements récents présentant les mêmes traits: prise en compte de mécanismes plus élaborés (implicatures, présuppositions) et recours à la psychologie expérimentale pour évaluer la plausibilité de modélisations linguistiques.

Autre perspective: les progrès du dialogue entre linguistique et traitement automatique du langage permettent d'améliorer sensiblement la construction et l'exploitation intelligentes de corpus: une tendance assez nette se dessine pour l'injection de catégorisa-

tions linguistiques fines dans des ressources linguistiques de taille importante ; la prise en compte des contradictions connues entre robustesse et précision dans les systèmes de traitement automatique jointe à la prise en compte des comportements des utilisateurs sont encore des problèmes cruciaux pour le développement des applications, qui ne peuvent trouver de solution que dans un environnement pluridisciplinaire.

Les très grands corpus de textes atteignent par ailleurs une taille comparable à celle de l'ensemble des productions langagières auxquelles a été exposé un humain – ils diffèrent certes dans leur composition relative. Cela ouvre des perspectives nouvelles pour l'étude des langues et de leur acquisition.

L'ancrage de la langue dans le monde est une dimension complémentaire que des chercheurs abordent de façon croissante, par l'intermédiaire par exemple de grands corpus où des textes sont associés à des images ou des vidéos, et où les caractéristiques des objets rencontrés dans ces modalités différentes sont mises en relation avec le contenu des textes.

Une autre discipline des SHS est au cœur des interactions avec les sciences cognitives : la philosophie. En effet, aujourd'hui, la recherche en philosophie se divise en deux entreprises distinctes. L'une s'inscrit dans le projet global des humanités guidées par la démarche historique et l'interprétation des textes. L'autre vise conjointement à élucider des énigmes conceptuelles engendrées par la démarche scientifique et à transformer en questions scientifiques des problèmes jusqu'alors inaccessibles à la démarche scientifique. La seconde démarche s'inscrit naturellement dans le contexte d'une étroite coopération avec d'autres disciplines scientifiques. Comme leurs noms l'indiquent, la philosophie de la logique, la philosophie des mathématiques, la philosophie de la physique et la philosophie de la biologie explorent les énigmes conceptuelles soulevées par le développement des sciences exactes correspondantes. La philosophie du langage est indissociable de la recherche en sémantique et, plus généralement, en linguistique. Depuis un quart de siècle, la phi-

losophie de l'esprit, la philosophie de la perception et la philosophie de l'action ont été profondément modifiées par la recherche expérimentale et formelle dans les sciences cognitives. L'esthétique et la philosophie morale elles-mêmes ont été affectées par le développement de la philosophie de l'esprit et des sciences cognitives. Dans ces différents domaines, la recherche en philosophie partage avec la recherche dans les autres domaines scientifiques le souci de suivre une démarche objective qui s'appuie essentiellement à la fois sur les recherches empiriques et sur l'argumentation logique, et s'expose ouvertement au jugement et aux objections des pairs. Il s'agit d'une démarche à caractère fortement interdisciplinaire, qui a sa place naturelle au sein de la CID44.

Enfin, on citera pour clore ce chapitre les développements récents en économie : on assiste depuis une vingtaine d'années à une véritable révolution scientifique en économie. Alors que cette discipline s'appuyait sur des données d'observation statistique ou comptable où la motivation des acteurs ne se révèle qu'indirectement et imparfaitement au travers de leurs choix sur les marchés ou dans les urnes, et où ces choix eux-mêmes se manifestent dans des contextes et des environnements hétérogènes, inobservables et incontrôlables, l'essor prodigieux de l'économie expérimentale et de la « neuroéconomie » en fait aussi, désormais, une science expérimentale. Procédant de plus en plus couramment à des expériences en laboratoire et sur le terrain, l'économie s'est beaucoup rapprochée de la psychologie – cognitive, sociale, expérimentale – et des neurosciences. L'économie comportementale bouscule ainsi les théories de la décision et des jeux et pénètre au cœur de la théorie économique. Mais la généralité et la précision des concepts économiques pourraient bien rejaillir prochainement en retour sur les modèles de la psychologie et des neurosciences.

Ce rapprochement des disciplines a sans doute été ralenti en France par le cloisonnement disciplinaire de nos universités. Mais de nouvelles formations pluridisciplinaires com-

mentent à apparaître dans les domaines de la cognition, de l'économie et de la psychologie.

## 6.3 INS2I

Si l'INS2I est par définition interdisciplinaire, il est vital de positionner cette interdisciplinarité au delà de la simple interface avec l'INSIS. En effet, cette zone de recouvrement, qui implique plus particulièrement les sections 7, 8, 9 et 10 du comité national, était déjà un souci avant la séparation du domaine ST2I en deux instituts, et il ne faut certainement pas négliger cette interface dans l'avenir. Or, s'il est important que les chercheurs en informatique collaborent de façon intensive avec ceux qui travaillent sur le développement et l'ingénierie des systèmes, les vrais enjeux pour l'interdisciplinarité au sein du CNRS sont peut être ailleurs et plus spécifiquement dans les interfaces avec les sciences de la vie et avec les sciences humaines. Pour être plus explicite, l'interface entre informatique et ingénierie des systèmes est également en plein centre des préoccupations de l'INRIA. Mais seul le CNRS a la couverture qui permet de promouvoir efficacement des collaborations entre les chercheurs travaillant sur les systèmes naturels et artificiels.

L'intelligence artificielle est un domaine de l'informatique fortement lié aux sciences cognitives. Que ce soit la philosophie dans le raisonnement et la modélisation des connaissances, la sémantique linguistique dans la fouille des masses de données textuelles, l'inspiration neuronale dans toute une famille d'algorithmes d'apprentissage, ou encore l'inspiration éthologique ou sociologique pour les systèmes multi-agents, l'informatique bénéficie d'apports de nombreuses autres disciplines.

Considérons le web sémantique, fondé sur la modélisation sous forme d'« ontologies » des éléments de connaissance que des systèmes informatiques vont échanger entre eux. La formalisation de ces ontologies est directement inspirée de deux millénaires de philo-

sophie de la connaissance et de logique ; leur construction, qui s'appuie la plupart du temps, au moins partiellement, sur des termes et définitions en langue naturelle, bénéficie des apports de la sémantique linguistique et de la terminologie.

La société de l'information génère une quantité croissante de données langagières pour lesquelles des traitements informatiques nouveaux ou plus performants doivent être conçus : c'est le cas de la recherche d'information, de la fouille de données textuelles (intelligence économique, veille concurrentielle, opinion, etc.), et plus généralement de l'extraction d'informations à partir de masses de documents numériques faisant appel à différents médias : textes (écrits numérisés et textes bruts), images (fixes ou animées), ou parole (audio, vidéo).

Nombre de verrous dans la modélisation du matériau sur lequel s'opèrent ces traitements et dans la performance des algorithmes que l'on y applique ne pourront sauter sans une compréhension réelle des propriétés de ce matériau. Les disciplines des sciences du langage contribuent à cette compréhension : au-delà des grands champs habituellement cités, mentionnons la modélisation des accents, des disfluences, des genres et types de discours, dont l'importance de l'influence sur les performances des systèmes automatiques est avérée. Au delà des sciences du langage, l'informatique interroge l'ergonomie, la psychologie ou la sociologie pour identifier la complémentarité entre ces types d'information et l'exploiter pour mieux répondre à des recherches d'utilisateurs et imaginer des services innovants.

L'interaction humain-machine est un autre champ de l'informatique dont le succès repose sur la prise en compte de connaissances sur les facultés cognitives humaines et sur l'analyse des collectifs. Ces connaissances, qu'apportent les disciplines des sciences cognitives, par exemple l'ergonomie cognitive, interviennent de deux façons. D'une part, pour modéliser les capacités, les comportements et les attentes de l'humain, seul ou au sein d'un groupe, en interaction avec l'ordinateur. D'autre part, comme dans la démarche de l'intelli-

gence artificielle, pour créer des artefacts informatiques dont le comportement soit rationnel et naturel pour l'humain qui interagit avec eux. Citons au passage le développement d'artefacts communicationnels comme les agents conversationnels animés, qui viennent assister l'interaction en lui apportant une touche plus humaine (par exemple, par l'expression et d'autres signes non verbaux, allant jusqu'à la restitution d'émotions).

Les environnements pour l'apprentissage humain, évoqués plus haut dans ce rapport, instancient cette problématique pour une tâche d'enseignement, ce qui renforce la nécessité du recours aux SHS pour arriver à des modèles computationnels appropriés.

## 6.4 INSIS

L'INSIS, Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes, est un institut dont l'objet d'étude est par essence demandeur d'interdisciplinarité. Nous en citons ci-dessous quelques exemples qui mobilisent les interactions entre systèmes complexes, sciences humaines et sociales, informatique, et cognition.

Le fantastique développement du web a créé un système complexe désormais incontournable dans notre vie personnelle et professionnelle, générateur quotidien de nouvelles applications et de services, à l'origine d'entreprises dont la valeur a dépassé celle d'entreprises plus traditionnelles. Son support informatique, son utilisation comme vecteur de communication et d'inscription de connaissance humaine, la nature multimodale et peu structurée des masses de données qu'il porte, langue, son, image, pour ne citer que quelques unes de ses dimensions, mobilisent des disciplines multiples dont la collaboration est nécessaire pour avancer dans sa modélisation et sa compréhension.

Autre exemple de système complexe, la réalité virtuelle fait intervenir des dimensions perceptives multimodales (visuelles, auditives,

haptiques, etc.), qui en font sans doute l'un des domaines dans lesquels l'imbrication entre système artificiel et cognition humaine est la plus forte. Ici encore, ingénierie, systèmes, informatique, ergonomie cognitive doivent collaborer pour dépasser ce que chacune peut apporter individuellement.

Citons enfin la robotique cognitive qui traite tous les problèmes de la cognition humaine puisque les capacités de décision, d'anticipation et de réflexivité sont nécessaires à un robot pour produire un comportement qui ne soit pas purement réactif, mais qui permette d'accomplir des tâches complexes. Le système robotique autonome perçoit à travers ses capteurs un environnement inconnu avec lequel il doit interagir à travers ses effecteurs. Sur la base de son interprétation sémantique de l'environnement et de son propre état, le robot doit décider de ses actions et par là-même anticiper les états futurs de l'environnement, raisonner sur les conséquences de ses actions, et effectuer des choix.

Ces capacités cognitives s'appuient sur des représentations sémantiques qui doivent tenir compte de l'incertitude de l'interprétation et de l'incomplétude de la perception. Elles impliquent de modéliser un processus de planification et d'exécution d'actions dont la mise en œuvre doit être supervisée et contrôlée par des mécanismes réactifs. Évidemment, l'apprentissage est transversal à toutes les capacités du robot – tant décisionnelles que perceptuelles – pour l'élaboration de représentations de l'environnement, d'objets, de concepts ou de situations dynamiques.

Enfin, toutes ces fonctions cognitives de perception, de décision et d'action doivent être intégrées dans une architecture permettant l'interaction entre ces composantes, l'apprentissage et le dialogue avec l'homme.

## 6.5 INSMI

Les divers programmes de recherche consacrés aux fondements mathématiques

des processus cognitifs et aux fondements cognitifs des mathématiques, au-delà des divergences qui s'y manifestent, présentent l'intérêt de montrer en quoi nombre de problèmes issus des sciences cognitives sont, peut-être avant tout, des problèmes mathématiques ou de philosophie des mathématiques. Les grands paradigmes qui s'affrontent dans le champ des sciences cognitives se laissent volontiers définir comme des façons de mettre les mathématiques au service d'une science de l'esprit. Les progrès des sciences cognitives sont d'ailleurs pour une large part tributaire du rôle croissant qu'y jouent la modélisation mathématique et les techniques de simulation informatique. Les concepts et les théories mathématiques dont il s'agit ne se limitent pas à la donnée d'une simple boîte à outils pour l'analyse des données (probabilités, statistiques, transformée de Fourier, etc.) Il s'agit aussi, et surtout, de structures mathématiques et d'algorithmes spécifiques permettant de modéliser et de simuler des classes spécifiques de phénomènes. En outre, les mathématiques constituent par elles-mêmes un champ d'investigation privilégié pour les sciences cognitives quand il s'agit de comprendre les fondements cognitifs de la discipline ou encore d'aborder le problème de leur enseignement. Enfin, la modélisation en sciences cognitives donne naissance à des problèmes mathématiques originaux qui engendrent l'apparition de théories nouvelles. Ces diverses interactions entre mathématiques et sciences cognitives peuvent s'appuyer en France sur une communauté mathématique dynamique et, symétriquement, sur une communauté de chercheurs en sciences cognitives souvent enclins – c'est l'une des spécificités de la recherche française en sciences cognitives – au questionnement des fondements théoriques de leur interdiscipline. Cependant beaucoup reste encore à faire pour impliquer davantage les mathématiciens. L'essence de leur démarche réside dans les démonstrations et dans la production d'algorithmes mais les mathématiques se nourrissent de questions qui prennent origine dans les autres sciences.

On connaît les grands apports, déjà anciens, des mathématiques aux neuro-

sciences, notamment à travers l'équation d'Hodgkin-Huxley, équation qui demeure fondamentale pour les modèles de neurones, mais qui nécessite encore des aménagements (comme ceux que propose la théorie des bifurcations de systèmes dynamiques). La description mathématique de la dynamique interne des activations biochimiques et des expressions génétiques en est encore à ses débuts. En revanche, les méthodes probabilistes en général ont trouvé un large terrain d'applications (codage par population, analyse bayésienne, apprentissage statistique, etc.). Les réseaux de Hopfield, autre référence importante dans le domaine des neurosciences, sont susceptibles de nombreux développements sur le plan proprement mathématique.

Pratiquement, toutes les mathématiques appliquées sont convoquées dans les recherches en sciences du cerveau. Dans certains secteurs, la recherche mathématique a clairement rejoint la recherche en neurosciences. Les domaines les plus actifs sont l'analyse d'images, l'analyse bayésienne, les statistiques, la théorie de l'information (probabiliste et algorithmique), les systèmes dynamiques (équations différentielles, systèmes statistiques), les équations aux dérivées partielles et la géométrie différentielle. L'analyse d'images et la vision artificielle impliquent l'analyse harmonique, à travers la théorie du signal (ondelettes), les équations aux dérivées partielles (filtrage échelle-espace, équations de diffusion non linéaires, géométrie multiéchelle, modèles variationnels), la topologie et la géométrie différentielles. Sans doute les structures mathématiques permettant une meilleure compréhension de la dynamique cérébrale sont-elles encore à améliorer et, pour certaines, à inventer. L'une des difficultés majeures est que le cerveau fonctionne à plusieurs niveaux, du plus concret jusqu'au plus abstrait, et que ces niveaux sont le plus souvent couplés et mêlent les échelles. Il est sans doute indispensable de préciser ou d'établir les liens, sur le plan intramathématique et en termes de modélisation, entre des structures, connues, d'algèbre, de logique, d'analyse et de géométrie mais aussi d'inventer d'autres structures dans ces

diverses branches des mathématiques et à leurs jonctions.

Ces questions sont d'ailleurs d'un intérêt général pour les sciences cognitives tant il est vrai que l'apport, actuel ou potentiel, des mathématiques aux sciences cognitives ne se limite pas aux neurosciences. Les modèles dynamicistes de syntaxe d'attracteurs, fondés sur la théorie des bifurcations et des déploiements universels de singularités, sont proches de ceux, développés en linguistique cognitive, qui s'attachent à étudier les liens entre la perception et les descriptions linguistiques associées. Le problème, loin d'être résolu dans son ensemble, est de construire les outils mathématiques pour modéliser les structures topologico-dynamiques, donc l'information morphologique, extraites des représentations perceptives et traitées par la sémantique des langues. Plus généralement, la mathématisation des concepts linguistiques (catégorisation, temps et espace...) doit mettre en jeu divers formalismes issus de la topologie, de la géométrie mais également du lambda-calcul, de la logique et de la théorie mathématiques des catégories. Il en va de même d'autres domaines des sciences sociales (cognitives) dont le degré de formalisation est moindre mais qui sont néanmoins susceptibles d'une approche formelle : formalisation de l'espace en géographie, formalisation du raisonnement juridique, interdépendances des représentations et de préférences en économie cognitive...

Les liens entre logique et géométrie, établis grâce à la théorie des faisceaux, la théorie des catégories et des topoi (et d'autres structures catégoriques plus générales) permettent, via une « géométrisation » de la vérité, d'appréhender à nouveaux frais des problèmes fondamentaux en sciences cognitives. Les catégories de faisceaux sur un espace donné possède un certain nombre de propriétés catégoriques fondamentales qui lui confère une structure (une structure de topos dans le cas d'un espace topologique) permettant d'interpréter un langage des prédicats dans une catégorie d'objets et de considérer la catégorie des faisceaux comme un univers de discours dont les

objets sont des entités variables dépendant d'une localisation spatiale. Cette dépendance spatiale est constitutive des valeurs de la vérité et, à ce titre, possède une pertinence sémantique. Les questions liées à la catégorisation, au raisonnement, à certains aspects de sémantique linguistique ainsi que celle du « sens » des concepts mathématiques sont, dès lors, susceptibles d'une appréhension essentiellement nouvelle. Par ailleurs, la géométrisation de la logique s'opère, grâce aux réseaux de preuves, dans la structure même des preuves. Ces évolutions de la logique ouvrent des horizons nouveaux en matière de mathématisation de champs spécifiques en sciences cognitives et, en retour, permettent de dégager un nouveau statut épistémologique pour la logique et les mathématiques.

Les liens entre mathématiques et sciences cognitives offrent, en effet, une nouvelle compréhension des mathématiques, de nouveaux points de vue sur les fondements des mathématiques émergeant de questions cognitives. Des questions, telles l'énigme de l'efficacité des mathématiques ou la constitution de l'objectivité mathématique, relèvent d'une longue tradition et a inspiré de nombreux mathématiciens selon des points de vue différents (Poincaré et Riemann, Frege et Hilbert, Weyl et Thom), tradition qui mérite d'être poursuivie et approfondie. La question de l'intuition et la construction de l'espace et du temps (faisant appel à la fois aux notions physiques et aux concepts psychologiques), donc de l'origine de la géométrie et, plus généralement, de l'origine sensible des mathématiques ; la dialectique platonisme – constructivisme ; la question des figures, de leur perception et des opérations qu'ils supportent, constituent un immense champ de recherche en sciences cognitives.

## 6.6 INP

Les physiciens sont impliqués de diverses façons dans l'étude des processus et systèmes cognitifs. Des données toujours plus nom-

breuses et diverses sont disponibles, que ce soit à l'échelle des molécules, des génomes, des cellules, des tissus et des organes ou même des individus et de leurs interactions. Les physiciens jouent un rôle important à la fois dans la collecte de ces données et leur analyse.

La connaissance des phénomènes biologiques, qui sous-tendent les processus cognitifs, a énormément progressé au cours des dernières décennies, en partie grâce au développement de procédés divers d'imagerie et d'enregistrement. La physique joue un grand rôle dans l'acquisition même de ces données que ce soit par le développement de techniques performantes de microscopie ou d'imagerie (IRMF), de nouveaux marqueurs fluorescents (nano-cristaux), ou bien encore de techniques pour manipuler des objets biologiques au niveau des molécules individuelles (pinces optiques, magnétiques...), des cellules et des tissus (microfluidique, surfaces structurées...). Elle a aussi grandement contribué au développement des outils de communication entre individus et d'enregistrement de leur activité (internet, puces émettrices/capteurs de tailles réduites...).

L'apport des physiciens à l'analyse théorique des processus cognitifs est aussi très significatif que ce soit par le développement de modèles de mémoire associative, d'apprentissage, de traitement de l'information où bien encore par l'analyse de différents phénomènes dynamiques (oscillations, états d'activité haut ou bas, plasticité synaptique à court et long terme...). En conséquence, de nombreux centres de neurosciences théoriques dans le monde sont dirigés par des physiciens théoriciens.

L'étude des réseaux de toutes sortes (neuronaux, internet, réseaux sociaux ou économiques) est aussi un sujet d'étude en évolution très rapide. L'analyse de leurs structures, de la manière dont ils se forment, de leur dynamique, de la façon dont ils traitent et transmettent l'information posent de nouvelles questions, qui ont été abordés avec succès avec des méthodes inspirées de la physique statistique. Les modèles proposés ont suscité un

grand intérêt dans l'ensemble de la communauté scientifique et cela paraît annonciateur de développements futurs très intéressants. L'interaction entre la physique et les sciences humaines n'en est encore qu'à ses débuts mais, que ce soit en «éconophysique», pour la propagation des épidémies ou la formation des opinions, elle paraît fructueuse et promise à un bel avenir.

La contribution des physiciens aux sciences cognitives ne se réduit évidemment pas à un simple transfert de techniques expérimentales ou d'analyse théorique. Bien au contraire, la spécificité et la difficulté des questions posées par les sciences cognitives demandent le développement d'outils, de mesure ou conceptuels, nouveaux et constituent une source d'enrichissement réel pour la physique elle-même. L'interface entre la physique et les sciences cognitives, en plein développement et très fertile, mérite donc un soutien fort.

## **7 – QUATRE PISTES POUR LA PROMOTION DE L'INTERDISCIPLINARITÉ EN SCIENCES COGNITIVES**

Dans cette section finale, nous explorerons quatre moyens pour promouvoir la recherche interdisciplinaire, plus spécifiquement dans le cas des sciences cognitives.

### **7.1 LE RÔLE DE LA FORMATION**

L'avenir de la recherche dépendra de l'existence de filières de formation innovantes qui permettent aux étudiants de se former dans un nombre important de domaines complémentaires. Les vingt dernières années ont vu une nette amélioration de l'offre, compensant, au moins en partie, la rigidité de certains

aspects du système d'éducation supérieure en France. L'existence historique des facultés de sciences et de lettres, prolongée dans de très nombreux endroits par une séparation nette entre des universités spécifiquement dédiées aux sciences dures, et des universités vouées aux sciences humaines, a été problématique pour le développement de programmes d'enseignement large. Le problème est particulièrement clair dans le cas de la psychologie, un domaine de recherche qui se doit d'être au cœur des sciences cognitives. Or, dans la plupart des universités françaises, la psychologie a été associée à des facultés de lettres. Cela dit, le regroupement des universités au niveau local dans des PRES (Pôles de Recherche et d'Enseignement Supérieur) permet aujourd'hui d'envisager plus facilement l'organisation de programmes en sciences cognitives large. Il faut intensifier cette démarche.

Un autre problème historique, conséquence de l'existence du système d'Écoles d'Ingénieur très spécialisées, est la difficulté pour les étudiants d'accéder à une formation dans les différents domaines des sciences cognitives. Or, lorsque l'on offre aux étudiants des Grandes Écoles la possibilité de suivre des formations riches et variées, les résultats peuvent être spectaculaires. L'exemple le plus saisissant est sans doute le DEA de Sciences Cognitives créé par Michel Imbert à Paris à la fin des années 80. Cette formation innovante proposait des cours dans pratiquement tous les domaines clés des sciences cognitives (psychologie cognitive, neurosciences, modélisation informatique, intelligence artificielle, philosophie, épistémologie, logique, linguistique, anthropologie), et impliquant de très nombreux chercheurs de grande renommée dans l'équipe d'enseignants. Habilitée par l'ENS, l'École Polytechnique, l'EHESS et plusieurs universités parisiennes, la formation attirait de très nombreux étudiants et étudiantes parmi les plus brillants. Les conséquences ont été à la hauteur, car si l'on prend en compte par exemple les étudiants qui ont suivi cette formation entre 1989 et 2002, on peut en compter plus d'une trentaine qui ont déjà été recrutés par les grands organismes de recherches comme le CNRS et l'INSERM, sans compter le

nombre également élevé de ces étudiants recrutés par les universités.

Le succès du DEA de Sciences Cognitives a été repris dans de nombreuses universités, et des Masters interdisciplinaires ont été créés dans des villes comme Bordeaux, Grenoble, Lyon, Marseille, Nancy, et Toulouse. Mais, malgré ces progrès, il est clair que les passerelles permettant aux jeunes d'obtenir une formation véritablement interdisciplinaire manquent dans de nombreux endroits, ou restent insuffisamment attractives.

## 7.2 LE RÔLE DES PROGRAMMES DE RECHERCHE

Depuis trente ans, il y a eu de nombreuses tentatives pour promouvoir la recherche interdisciplinaire. Des programmes tels « Cognisciences » (1990) qui a permis la création de sept pôles régionaux, le GIS Sciences de la Cognition (1995), Cognitique (1998), l'ACI Neurosciences Computationnelles (2002) et TCAN (Traitement des Connaissances, Apprentissage et Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) en 2003 ont tous participé au développement des sciences cognitives en France.

Avec l'introduction de l'Agence Nationale de la Recherche en 2005, la programmation de la recherche en France est entrée dans une nouvelle phase. Certains appels d'offre ont directement ciblé les sciences cognitives, comme l'appel « Apprentissages, connaissances et société » lancé par le comité Sciences Humaines et Sociales en 2006, et les programmes « Contenus et Interactions » et le Défi Robotique « Cartographie par ROboT d'un Territoire (CAROTTE) » lancés par le comité Sciences et Technologies de l'Information en 2009. Mais, si le souhait de promouvoir la recherche interdisciplinaire est présent dans nombre d'appels d'offres, il est clair que l'existence de comités de sélection avec une orientation plutôt disciplinaire est loin de faciliter l'évaluation de projets interdisciplinaires. Aujourd'hui, l'ANR

souhaite soutenir un pourcentage accru de projets non-thématiques à travers les programmes « Blanc » et « Jeunes Chercheurs ». Or, en absence d'un véritable comité de sélection en sciences cognitives à large spectre, le choix d'experts peut être compliqué. Si l'on considère les Comités Scientifiques Sectoriels « Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication », « Sciences Humaines et Sociales », et « Biologie-Santé », il est loin d'être évident que le domaine des sciences cognitives trouve vraiment la place qui devrait être la sienne. Une partie importante des dossiers blancs et jeunes chercheurs peut raisonnablement être traitée par le comité SHS2 (« Développement humain et cognition, langage et communication »), mais il est clair que cette instance ne peut traiter qu'une partie des thématiques à moins qu'elle ne puisse s'adjoindre la présence d'experts dans d'autres domaines et notamment celui des neurosciences et de l'informatique. Le traitement des sciences cognitives mériterait une discussion approfondie, impliquant le CNRS et les autres organismes concernés.

### **7.3 LE RÔLE DES CENTRES DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES ET DU RISC**

Une autre façon de promouvoir l'interdisciplinarité consiste à créer de véritables fédérations de recherche regroupant plusieurs laboratoires et équipes d'horizons différents. L'une des illustrations les plus réussies est sans doute le Département d'Études Cognitives (DEC), un département transdisciplinaire de l'École normale supérieure. Ce centre, créé relativement récemment, regroupe 5 structures CNRS et deux laboratoires INSERM couvrant une étendue remarquable de domaines allant de la Physique Théorique à la Psycholinguistique et la Philosophie, en passant par les Neurosciences Cognitives, l'Audition, et les Neurosciences Computationnelles. Il faut insister sur le fait que ces interactions doivent per-

mettre à chacun de conserver la spécificité de ses démarches tout en s'enrichissant et en s'ouvrant à de nouveaux domaines au contact des autres.

Un autre exemple d'un centre spécialisé dans la recherche interdisciplinaire est l'Institut des Sciences Cognitives, créé par Marc Jeanne-rod à Lyon. Officiellement créé en Janvier 1997, et installé dans son nouveau bâtiment en Avril 1998, l'Institut regroupe deux laboratoires CNRS, le Centre de Neurosciences Cognitives (UMR 5229) et le Laboratoire Langage, Cerveau, Cognition (UMR 5230), couvrant ainsi une partie importante des sciences cognitives, et plus spécifiquement l'interface entre Neurosciences, Psychologie et Sciences du Langage. À Marseille, le pôle 3C sur le site de St Charles de l'Université de Provence est un autre endroit où l'interface entre Psychologie et Neurosciences a pu être renforcée par le regroupement de plusieurs laboratoires CNRS sur le même site. D'autres groupements de recherches interdisciplinaires se trouvent à Toulouse (où le pôle PRESCOT a joué un rôle fédérateur important de 1990 à 2002) et plus particulièrement à Grenoble, où le Pôle Grenoble Cognition va regrouper des laboratoires venant de tous les domaines des sciences cognitives.

Enfin, soulignons aussi l'importance du RISC (le Relais d'information sur les sciences de la cognition, l'UMS 3332) pour le développement de la recherche en sciences cognitives – voir son site <http://www.risc.cnrs.fr/>. C'est une source d'information très précieuse pour les chercheurs du domaine, où l'on trouve les annonces des conférences, ateliers et workshops, mais également une carte interactive des centres impliqués avec plus de 360 adresses. Le RISC héberge également un nombre important de sites web concernés par les sciences cognitives, tels FRESCO (Fédération française des étudiants et jeunes chercheurs en sciences cognitives), COGIGER (Un réseau en Ingénierie Cognitive), ainsi que les sites web de plusieurs projets financés par des programmes ANR. Le RISC a également piloté les ateliers PIRSTEC.

## 7.4 LE RÔLE DE LA CID 44

La dernière piste concerne le rôle des Commissions Interdisciplinaires, telles la CID 44. L'un de ses rôles principaux est le recrutement et la promotion de chercheurs dont les contributions appartiennent par définition à des domaines d'expertise variés et sont donc difficilement évaluées par les sections classiques du Comité National. C'est un rôle très important, qui nécessite que chacun des membres soit très attentif à tous les domaines devant interagir. Ce rôle est assumé avec beaucoup de sérieux par tous ses membres. En huit ans, depuis sa création en 2003, la CID 44 (et son prédécesseur, la CID 45) a procédé au recrutement de 16 chercheurs DR2, 12 chercheurs CR1 et 26 chercheurs CR2.

L'un des critères souvent utilisés par la CID est la prise de risque et la volonté des candidats d'explorer des domaines de recherche qui sortent des sentiers battus. En effet, pour le CNRS, il est primordial de recruter des chercheurs créatifs, capables de changer de direction au cours de leur carrière et d'être à l'avant garde de la recherche. Souvent, ces chercheurs ont dû prendre des risques lors de leur formation en se formant dans plusieurs domaines. Ainsi, un élève ingénieur qui décide de faire une thèse dans un domaine très différent comme la psychologie cognitive ou les neurosciences peut réduire ses chances d'être recruté sur un poste d'enseignant classique. Et même dans les sections du comité national, une candidature un peu originale relevant de plusieurs domaines peut avoir des difficultés puisqu'une partie de son activité relève de domaines qui ne sont pas dans les compétences de la section.

Un autre aspect intéressant du processus de recrutement au sein d'une CID vient du fait que, vu sa composition, aucune sous discipline ne peut avoir une majorité de votants à elle seule. Le classement des candidats nécessite donc un réel consensus entre des spécialistes venant d'horizons très variés. Il est ainsi pos-

sible d'éviter des situations de blocage qui peuvent exister dans des sections classiques lorsqu'il y a séparation entre plusieurs « écoles ».

Depuis ses débuts, les postes affectés aux CID ont été attribués par les départements scientifiques du CNRS, et plus récemment par les instituts. L'une des conséquences de cette politique est une tendance à utiliser des coloriages voire des fléchages qui ont été, certaines fois, très ciblés. Ce mode de fonctionnement nous paraît loin d'être optimal. En général, il est beaucoup plus attractif de proposer des concours ouverts, afin de susciter la plus grande diversité de candidatures. De plus, il faut insister sur l'importance d'avoir la possibilité de bénéficier d'un concours ouvert à tous les niveaux de recrutement – DR2, CR1 et CR2.

La CID 44 a déjà joué un rôle important dans le recrutement et la promotion de chercheurs au niveau DR2, et dans l'avenir elle doit pouvoir également jouer un rôle dans les promotions au niveau DR1 et classe exceptionnelle. Ouvrir cette possibilité est d'une extrême importance si le CNRS veut favoriser la mobilité thématique de ses chercheurs. En effet, l'existence même des commissions interdisciplinaires est un encouragement aux chercheurs qui hésitent à diversifier leurs thématiques de recherche ou à travailler en collaboration aux interfaces. Avec la division du CNRS en instituts, cette souplesse est devenue encore plus vitale.

Enfin, il faut insister sur le fait que, si en règle générale, les CIDs n'ont pas vocation à être pérennes, le cas des sciences cognitives est particulier. Il s'agit là d'un véritable domaine de recherche interdisciplinaire qui existe depuis longtemps et qui est en évolution perpétuelle. Il ne s'agit pas d'un domaine qui pourrait être repris par des sections traditionnelles du comité national, car aucune de ses sections ne pourrait inclure l'ensemble des thématiques qui le constitue. Pour toutes ces raisons, la pérennité d'une structure telle que la CID44 pour promouvoir les recherches en sciences cognitives au sein du CNRS semble incontournable.

## ANNEXE 1 : UNITÉS CNRS TRAVAILLANT DANS LES SCIENCES COGNITIVES

UMR5020	Neurosciences sensorielles, comportement, cognition	<i>Lyon</i>	Rémi GERVAIS
UMR5022	Laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement (LEAD) (LEAD)	<i>Dijon</i>	Emmanuel BIGAND
UMR5105	Laboratoire de psychologie et neurocognition	<i>Grenoble</i>	Sylviane VALDOIS
UMR5167	Physiopathologie des réseaux neuronaux du cycle veille-sommeil	<i>Lyon</i>	Pierre Herve LUPPI
UMR5169	Centre de recherches sur la cognition animale (CRCA)	<i>Toulouse</i>	Martin GIURFA
UMR5175	Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE)	<i>Montpellier</i>	Jean-Dominique LEBRETON
UMR5191	Interactions, Corpus, Apprentissage, Représentations (ICAR)	<i>Lyon</i>	Lorenza MONDADA
UMR5205	Laboratoire d'Informatique en Images et Systèmes d'Information (LIRIS)	<i>Lyon Villeurbanne</i>	Atila BASKURT
UMR5216	GIPSA	<i>Grenoble St Martin d'Herès</i>	Jean-Michel DION
UMR5217	Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG)	<i>Grenoble St Martin d'Herès</i>	Brigitte PLATEAU
UMR5220	Centre de Recherche et d'Applications au Traitement de l'Image et du Signal (CREATIS)	<i>Lyon Villeurbanne</i>	Isabelle MAGNIN
UMR5227	Laboratoire mouvement adaptation cognition	<i>Bordeaux</i>	Jean Rene CAZALET
UMR5228	Centre de neurosciences intégratives et cognitives	<i>Bordeaux Talence</i>	Georges DI SCALA
UMR5229	Centre de neuroscience cognitive	<i>Lyon</i>	Jean-Rene DUHAMEL
UMR5230	Laboratoire sur le langage, le cerveau et la cognition (L2C2)	<i>Lyon Bron</i>	Ira Andrew NOVECK
UMR5231	Imagerie moléculaire et fonctionnelle : de la physiologie à la thérapie	Bordeaux	Chretien MOONEN
UMR5263	Cognition, Langues, Langages, Ergonomie (CLLE)	<i>Toulouse</i>	Jean-Francois BONNEFON
UMR5505	Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT)	<i>Toulouse</i>	Luis FARINAS DEL CERRO
UMR5506	Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (LIRMM)	<i>Montpellier</i>	Michel ROBERT

UMR5525	Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité – Informatique, Mathématiques et Applications de grenoble (TIMC-IMAG)	<i>Grenoble La Tronche</i>	Jacques DEMONGEOT
UMR5549	Centre de recherche cerveau et cognition (CERCO)	<i>Toulouse</i>	Michele FABRE THORPE
UMR5596	Dynamique du langage	<i>Lyon</i>	Francois PEL-LEGRINO
UMR5800	Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI)	<i>Bordeaux Talence</i>	Marie-Pierre DELEST
UMR6024	Laboratoire de psychologie sociale et cognitive (LAPSCO)	<i>Clermont Ferrand</i>	Markus BRAUER
UMR6039	Bases corpus et langage (BCL)	<i>Nice</i>	Tobias SCHEER
UMR6057	Laboratoire Parole et Langage (LPL)	<i>Aix en Provence</i>	Philippe BLACHE
UMR6059	Centre d'épistémologie et ergologie comparatives (CEPERC)	<i>Aix en Provence</i>	Gabriella CROCCO
UMR6072	Groupe de REcherche en Informatique, Image, Automatique et Instrumentation de Caen (GREYC)	<i>Caen</i>	Étienne GRANDJEAN
UMR6146	Laboratoire de psychologie cognitive (LPC)	<i>Marseille</i>	Jonathan GRAINGER
UMR6149	Neurosciences intégratives et adaptatives	<i>Marseille</i>	Christian XERRI
UMR6155	Laboratoire de neurobiologie de la cognition (LNC)	<i>Marseille</i>	Bruno POU CET
UMR6166	Laboratoire d'informatique Fondamentale de Marseille (LIF)	<i>Marseille</i>	Francois DENIS
UMR6193	Institut de neurosciences cognitives de la méditerranée, approches fondamentale et clinique (INCM)	<i>Marseille</i>	Driss BOUSSA OUD
UMR6196	Plasticité et physio-pathologie de la motricité (P3M)	<i>Marseille</i>	Laurent VINAY
UMR6207	Centre de physique théorique (CPT)	<i>Marseille</i>	Marc KNECHT
UMR6232	Centre d'imagerie – neurosciences et d'applications aux pathologies (CI-NAPS)	<i>Caen</i>	Bernard MAZOYER
UMR6233	Institut des sciences du mouvement – Étienne-Jules Marey (ISM)	<i>Marseille</i>	Jean-Louis VERCHER
UMR6234	Centre de recherches sur la cognition et l'apprentissage (CeRCA)	<i>Poitiers/Tours</i>	Jean-Francois ROUET
UMR6265	Centre des sciences du goût et de l'alimentation (CSGA)	<i>Dijon</i>	Luc PENICAUD
UMR6552	Éthologie animale et humaine (EthoS)	<i>Rennes</i>	Martine HAUSBERGER

UMR6597	Institut de recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)	<i>Nantes</i>	Michel MALABRE
UMR7018	Laboratoire de Phonétique et Phonologie (LPP)	<i>Paris</i>	Jacqueline VAISSIERE
UMR7023	Structures formelles du langage	<i>Paris</i>	Sophie WAUQUIER
UMR7102	Neurobiologie des processus adaptatifs (NPA)	<i>Paris</i>	Jean MARIANI
UMR7114	Modèles, Dynamiques, Corpus (MoDyCo)	<i>Paris Nanterre</i>	Jean Luc MINEL
UMR7118	Analyse et Traitement Informatique de la Langue Française (ATILF)	<i>Nancy</i>	Jean-Marie PIERREL
UMR7152	Laboratoire de physiologie de la perception et de l'action (LPPA)	<i>Paris</i>	Sidney WIENER
UMR7206	Éco-Anthropologie et ethnobiologie	<i>Paris</i>	Serge BAHUCHET
UMR7210	Institut de la vision	<i>Paris</i>	José-Alain SAHEL
UMR7222	Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques (ISIR)	<i>Paris</i>	Philippe BIDAUD
UMR7225	Centre de recherche de l'institut du cerveau et de la moelle épinière (CRICM)	<i>Paris</i>	Bernard ZALC
UMR7503	Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (LORIA)	<i>Nancy Vandoeuvre les Nancy</i>	Karl TOMBRE
UMR7534	Centre de recherches en mathématiques de la décision (CEREMADE)	<i>Paris</i>	Jean DOLBEAULT
UMR7637	Laboratoire de neurobiologie	<i>Paris</i>	Serge BIRMAN
UMR7656	Centre de recherche en épistémologie appliquée (CREA)	<i>Paris</i>	Paul BOURGINE
UMR8022	Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL)	<i>Lille Villeneuve d'Ascq</i>	Sophie TISON
UMR8051	Équipe Traitement de l'Information et Systèmes (ETIS)	<i>Paris Cergy Pontoise</i>	Inbar FIJALKOW
UMR8094	Langues, textes, traitements informatiques, cognition (LATTICE)	<i>Paris Montrouge</i>	Michel CHAROLLES
UMR8119	Laboratoire de neurophysique et physiologie (LNP)	<i>Paris</i>	Claude MEUNIER
UMR8129	Institut Jean-Nicod	<i>Paris</i>	Francois RECANATI
UMR8158	Laboratoire psychologie de la perception (LPP)	<i>Paris</i>	John Kevin O'REGAN
UMR8163	SAVOIRS, TEXTES, LANGAGE (STL)	<i>Lille Villeneuve d'Ascq</i>	Christian BERNER

UMR8195	Centre de neurosciences Paris-Sud	<i>Paris Orsay</i>	Serge LAROCHE
UMR8550	Laboratoire de physique statistique de l'ENS (LPS)	<i>Paris</i>	Éric PEREZ
UMR8554	Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique (LSCP)	<i>Paris</i>	Anne CHRIS- TOPHE-SIRET
UMR8557	Centre d'analyses et de mathématiques sociales (CAMS)	<i>Paris St Cloud</i>	Henri BERES- TYCKI
UMR8590	Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques	<i>Paris</i>	Jacques DUBUCS
UMR9912	Sciences et Technologies de la Musique et du Son (STMS)	<i>Paris</i>	<i>Hugues VINET</i>
UMS3042	Moyens Informatiques Multimedia, Information Scientifique (MI2S)	<i>Grenoble</i>	Nicolas BALACHEFF
UMS3332	Relais d'information sur les sciences de la cognition (RISC)	<i>Paris</i>	Jean LORENCEAU
UMS838	Unité mixte de service de la maison de la recherche de l'université de Toulouse le Mirail (UMSTM)	<i>Toulouse</i>	Bertrand JOUVE
UMS839	Institut Henri Poincaré (IHP)	<i>Paris</i>	<i>Cédric VILLANI</i>
UPR3251	Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI)	<i>Paris Orsay</i>	Patrick LE QUERE
UPR3293	Unité de neurosciences, information et complexité (UNIC)	<i>Paris Gif sur Yvette</i>	Yves FREGNAC
UPR7051	Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA)	Marseille	Dominique HABAULT
UPR8001	Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS)	<i>Toulouse</i>	Raja CHATILA
URA2182	Gènes, synapses et cognition	<i>Paris</i>	Pierre-Marie LLEDO
USR3246	Centre émotion-remédiation et réalité virtuelle	<i>Paris</i>	Roland JOUVENT
FR2559	Typologie et universaux linguistiques : données et modèles	<i>Paris</i>	Stephane ROBERT
FRE3234	Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (LAMSADÉ)	<i>Paris</i>	Vangelis PASCHOS
FRE3289	Laboratoire d'imagerie et de neurosciences cognitives (LINC)	<i>Strasbourg</i>	<i>Christian KELCHE</i>
FRE3291	Laboratoire de neurosciences fonctionnelles et pathologies (LNFP)	<i>Lille</i>	Muriel BOUCART
FRE3292	Laboratoire de psychologie et neuropsychologie cognitives	<i>Paris Boulogne Bilancourt</i>	Nicole FIORI
FRE3304	Laboratoire d'automatique, de mécanique et d'informatique industrielles et humaines (LAMIH)	<i>Valenciennes</i>	Thierry Marie GUERRA

## ANNEXE 2 : GROUPEMENTS DE RECHERCHE

GDR2286	Mathématique des systèmes perceptifs et cognitifs (MSPC)	<i>Paris</i>	Gabriel PEYRE
GDR2647	STIC Santé	<i>Paris Évry</i>	Stephen THOMAS
GDR2657	Approche pluridisciplinaire de la production verbale écrite	<i>Poitiers</i>	Denis ALAMARGOT
GDR2822	GDR d'éthologie	<i>Rennes</i>	Martine HAUSBERGER
GDR2905	Neurosciences de la mémoire (NeuroMem)	<i>Paris Orsay</i>	Serge LAROCHE
GDR2967	Groupe de recherche en audiologie expérimentale et clinique (GRAEC)	<i>Paris</i>	Christian LORENZI
GDR3045	Groupe de recherche en vision (GDR Vision)	<i>Paris</i>	Pascal MAMASSIAN
GDR3072	Robotique	<i>Montpellier</i>	Étienne DOMBRE
GDR3169	Psychologie ergonomique et ergonomie cognitive (Psycho Ergo)	<i>Nantes</i>	Jean-Michel HOC
GDR3195	Langues, Langage oral, cognition : acquisition et dysfonctionnements – nouvelles approches	<i>Paris</i>	Maya HICKMANN-PERRIN
GDR720	Information, signal, images, vision (ISIS)	<i>Paris</i>	Jean-Pierre COCQUEREZ
GDR722	Information-interaction-intelligence (I3)	<i>Toulouse</i>	Florence SEDES

## ANNEXE 3 : FÉDÉRATIONS

IFR1	RMN biomédicale et neurosciences	<i>Grenoble</i>	Jean-François LE BAS
IFR131	Sciences du cerveau et de la cognition	<i>Marseille</i>	Bruno POU CET
IFR19	IFR des neurosciences de Lyon	<i>Lyon</i>	François JOURDAN
IFR25	Réseau fédératif de recherche sur le handicap	<i>Paris Villejuif</i>	Jean-François RAVAUD
IFR2819	ATLANSTIC	<i>Nantes</i>	Frédéric BENHAMOU
IFR37	Institut fédératif de recherche en neurosciences	<i>Strasbourg</i>	Paul PEVET

IFR49	Institut d'imagerie neurofonctionnelle	<i>Paris Gif sur Yvette</i>	Denis LE BIHAN
IFR8	Institut des neurosciences de Bordeaux	<i>Bordeaux</i>	Bernard BIOULAC
IFR92	Qualités des aliments et sensorialités	<i>Dijon</i>	Yves ARTUR
IFR95	Institut des neurosciences des Saints-Pères	<i>Paris</i>	Philippe DJIAN
IFR96	Institut des sciences du cerveau de Toulouse : handicap et neurosciences	<i>Toulouse</i>	François CHOLLET
FRC2118	Institut de Neurobiologie Alfred Fessard (INAF)	<i>Paris Gif sur Yvette</i>	Yves FREGNAC

# 45

---

## **DYNAMIQUE DES SYSTÈMES ENVIRONNEMENTAUX, DÉVELOPPEMENT DURABLE, SANTÉ ET SOCIÉTÉ**

*Président*

Joël GUIOT

Fabienne AUJARD

Ilham BEN TALEB

Jean-Pierre CAMBON

Christopher CARCAILLET

Brigitte CROUAU-ROY

Marie GAILLE

Didier GALOP

Josette GARNIER

Tatiana GIRAUD

Martine HOSSAERT

Jean-Paul LAURENT

Nadine LE BRIS

Sovan LEK

Sandrine MALJEAN-DUBOIS

Emmanuelle MONTARGES-PELLETIER

Luc ORTLIEB

Graciela PAVON-DJAVID

Jean-Louis SALAGER

Alexandros TSOUKIAS

Christiane WEBER

### **1 – INTRODUCTION**

La CID 45 est construite autour d'objets, les systèmes environnementaux, et non autour de disciplines. Ainsi, on peut plus facilement aborder les systèmes sous l'angle des interactions homme – milieu. L'étude intégrée de ces systèmes va clairement au-delà de l'étude des aléas qui est souvent disciplinaire (séismes, climat, contaminations...). Les communautés qui étudient ces aléas sont souvent déjà bien structurées au sein des instituts du CNRS comme l'INSU, l'INC, l'INP... Celles qui étudient les impacts de ces aléas se retrouvent au sein de l'INSB quand il s'agit de la santé des individus, ou de l'INSHS quand il s'agit de la réponse sociale, des politiques publiques, du coût financier ou humain qui en découlent. Mais quand on veut prendre en compte les interactions entre l'aléa et l'Homme en tant qu'acteur et récepteur, un niveau de complexité est ajouté que seule une approche systémique telle qu'elle est impulsée par l'INEE permet d'appréhender. En particulier, c'est une telle approche qu'il faut mettre en place pour étudier les effets d'une perturbation sur la société et réfléchir aux politiques, instruments juridiques et économiques, qui doivent être mis en place pour en renforcer la résilience et donc sa durabilité. L'arrivée de nouveaux ris-

ques issus des nouvelles technologies et les réactions en chaîne suite à une perturbation dans un système hautement sophistiqué nécessitent elles-mêmes une approche intégrée. C'est dans ces domaines que la CID 45 entend opérer.

À cette notion de système, est nécessairement associée la notion de territoire. C'est le cadre dans lequel se déroulent les processus bio-géo-physico-chimiques qui interagissent avec les habitants de ce territoire. On va parler d'écologie du paysage, de fonctionnement des écosystèmes, de biodiversité, d'organisation spatiale, de processus de transfert des contaminants d'une échelle microscopique à l'échelle de l'écosystème. Le changement d'échelle est donc fondamental dans cette approche. La CID 45 entend émuler une approche « observation – expérimentation – modélisation – validation ». L'observation, et donc les systèmes d'observation et les banques de données qui structurent l'information et la rendent disponible à la communauté, sont nécessaires pour le suivi des systèmes. La modélisation est l'outil privilégié pour décrire et prédire et donc finalement pour aider à la décision. Elle repose sur l'expérimentation et les données de terrain, via des systèmes d'information géographique. La modélisation doit être conçue à l'échelle du territoire afin de la rendre opérationnelle pour les acteurs du territoire. Cela implique des instruments tels que les écotrons, des plateformes écologiques expérimentales, des sites instrumentés, des observatoires hommes-milieux (OHM), des réseaux de plateformes et des fédérations d'équipes, des moyens de calcul et de grandes bases de données.

On comprend aisément que l'interdisciplinarité est inhérente aux sciences de l'environnement. Mais cette notion est très ouverte et son évaluation est donc difficile. Comme indiqué dans le rapport de conjoncture 2006, l'interdisciplinarité ne s'impose pas, mais doit se construire à partir d'une réelle nécessité scientifique et/ou sociétale. À la différence de la pluridisciplinarité, qui est une simple collaboration entre plusieurs disciplines, l'interdisciplinarité implique une volonté commune de collaboration, de confrontation de concepts et

de méthodes dès la naissance du projet scientifique. Cette interdisciplinarité trouve sans doute son aboutissement le plus accompli mais également sa plus grande difficulté de réalisation dans le mariage « sciences dures – sciences humaines et sociales ».

## **2 – LES ENJEUX SCIENTIFIQUES**

### **2.1 CHANGEMENTS GLOBAUX**

Les problématiques relatives aux questions environnementales et au développement durable sont nées dans les années 1970. Les avancées scientifiques montrant sans ambiguïté que notre planète se réchauffe à cause des activités humaines et que certaines conséquences sont inévitables ont permis une prise de conscience des décideurs, aboutissant à plusieurs actions politiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et s'adapter aux changements climatiques (adoption de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique en 1992).

Nous arrivons aujourd'hui à une période charnière au cours de laquelle les perceptions économique, sociale et politique du changement climatique sont devenues un enjeu mondial et donc une dimension majeure de la définition des politiques publiques. Des questions cruciales sont posées à la recherche, notamment en ce qui concerne (i) l'articulation entre les politiques globales à long terme et les actions locales (régionales ou nationales) plus radicales et parfois rapides, ou (ii) l'évaluation de la pertinence de la transposition de l'outil « permis négociables » au plan international, dans une société internationale encore faiblement hiérarchisée et institutionnalisée. Cela pose le problème de la viabilité du Protocole de Kyoto et du post-2012. La Conférence de Copenhague sur les changements climatiques (décembre 2009), dont les résultats sont très

modestes, témoigne de la difficulté à répondre à cet enjeu à l'échelle internationale dans le cadre des modes actuels de gouvernance. Par ailleurs, la nécessité pour l'industrie de mettre en œuvre une révolution technologique adéquate, créent de nouvelles opportunités pour le développement économique qu'il faut encore préciser et scénariser. Cette révolution technologique implique une véritable révolution sociétale en terme de nouveaux modèles de civilisation et de nouveaux schémas de développement.

### **La recherche en France dans un contexte international**

Les changements environnementaux sont désormais clairement perceptibles à l'échelle de la planète, d'où le terme de « Changements Environnementaux Planétaires » (CEP).

La prise de conscience du changement global, notamment climatique, a abouti à une multiplication de programmes. Au niveau international, le GIEC évalue le changement climatique (groupe 1), ses impacts (groupe 2) et les stratégies d'adaptation et de mitigation (groupe 3). Le « Millennium Ecosystem Assessment » (MA) traite des aspects liés à la vulnérabilité des écosystèmes. Le MA établit le statut et les tendances des changements des écosystèmes et reconnaît l'importance de l'utilisation des sols et des changements des surfaces terrestres (programme « Land-Use and Land Cover Change ou LULCC lancé par le MA).

Le CNRS agit dans ce domaine depuis longtemps au travers de l'INSU, dont les équipes de recherche ont une position de pointe dans tout ce qui relève du groupe 1. Un certain nombre de laboratoires de l'INEE (souvent liés également à l'INSU ou l'INSHS) apportent des réponses aux préoccupations des groupes 2 et 3 du GIEC et du MA. Ces recherches des groupes 2 et 3, de nature interdisciplinaire, concernent au premier plan la CID 45 qui a recruté récemment plusieurs chercheurs dans ces domaines.

Enfin, un des enjeux majeurs de la recherche environnementale actuelle consiste à faire

émerger une approche systémique, au carrefour de nombreuse disciplines, sur ce champ de recherche en plein essor qualifié de « Science du Système Terre » (« Earth System Science Partnership », ESSP, en anglais) à l'interface avec les grands programmes internationaux qui composent l'ESSP (DIVERSITAS, IGBP, IHDP et WCRP). La France affiche de réels potentiels sur certains compartiments des sciences du Système Terre (notamment la modélisation du climat, la gestion de l'eau, les usages du sol, la santé) et a lancé le programme CEPS (Changement Environnementaux Planétaires et Sociétés) de l'ANR afin d'accélérer la coordination et l'intégration des recherches françaises sur la thématique ESSP. Il s'agit non seulement de développer des recherches prospectives ou rétrospectives sur l'étude de processus et d'impacts, mais aussi de favoriser des recherches sur l'évolution de différents systèmes économiques, sociétaux, écologiques, etc. interagissant sous l'impact du changement global, afin de permettre des projections, notamment sur les 30 à 100 prochaines années.

L'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France (ONERC) a pour objectif de collecter et diffuser les informations liées à cette problématique. Il est le lien avec le GIEC. Il doit formuler des recommandations sur les mesures à prendre pour limiter les risques. Il n'est pas là pour stimuler directement les recherches, mais, en tant qu'observatoire, il peut aider ces recherches. Le programme de Gestion et Impacts du changement climatique (GICC) du Ministère de l'Écologie a en revanche un rôle de financement des recherches en aval du changement climatique.

### **L'apport de l'étude du passé**

L'apport de la paléoclimatologie à l'identification des événements climatiques et de leurs impacts sur les environnements et la société, à différentes échelles de temps et pour la compréhension des mécanismes sous-jacents n'est plus à démontrer. L'apport des équipes françaises dans cette discipline a une

visibilité internationale indiscutable. Elles évoluent dans le giron des sections 19 et 20. Les disciplines dites « paléo » jouent également un rôle important dans les études de vulnérabilité aux changements globaux.

Combinée à l'étude des archives historiques et naturelles du passé, la modélisation des impacts permet de distinguer la variabilité naturelle (paléoécologie, paléohydrologie, paléo-océanographie...) de la variabilité induite par les activités anthropiques. L'archéologie et l'anthropologie permettent d'étudier les interactions des sociétés avec leur environnement à l'échelle des derniers millénaires dans un cadre « grandeur nature ». Le bassin Méditerranéen (en particulier dans le cadre du programme MISTRALS/Chantier Méditerranéen) est un cadre intéressant pour ce type de recherches, avec PALEOMEX pour la relation entre les civilisations méditerranéennes et les changements environnementaux. La prise en compte de notre histoire *sensu lato* permet de travailler à différentes échelles spatio-temporelles allant de la mésoéchelle, échelle des processus écosystémiques, de l'action économique et sociale et de l'écologie des paysages, à des échelles du territoire et au-delà. C'est également la préoccupation du programme PALEO2 qui a pour ambition de stimuler une vision intégrée de l'évolution conjointe du climat et de l'environnement incluant les sociétés.

Les grandes échelles de temps permettent également de tester nos modèles sur des gammes de variabilités bien plus larges que celles permises par les données instrumentales. L'intégration des disciplines allant de la paléoclimatologie à l'archéologie en passant par la paléoécologie, la géophysique, la biogéochimie, histoire... permet de tester les modèles de type ESSP sur de vastes échelles spatio-temporelles, à la condition qu'une vraie approche interdisciplinaire soit mise en place. Sur le dernier millénaire, les reconstructions anthropiques, grâce aux collaborations avec les historiens, fournissent les conditions limites à des modèles biogéochimiques de bassins versant et permettent ainsi de mieux scénariser le futur.

## Les faiblesses de la communauté française

Le CNRS détient un rôle clé dans le développement des recherches dans le domaine des changements globaux. Dans le domaine des impacts et de la vulnérabilité à ces changements, en particulier dans les pays en développement, l'INRA, le CIRAD, l'IRD y tiennent une place également importante. Si on ajoute à ces organismes les instances citées plus haut, comme l'ONERC, l'ANR, on ne peut pas conclure que la faiblesse de la France vienne des moyens mis en œuvre, mais plutôt d'un manque de coordination. On voit par exemple une surenchère de programmes focalisés sur les problèmes immédiats et un délaissement des recherches fondamentales, alors que tout est loin d'être connu dans les mécanismes du climat lui-même et des impacts à long terme. La préparation d'une communauté de jeunes chercheurs est également cruciale. À part sur quelques sites historiquement forts, les universités n'offrent pas toujours des formations visibles sur tous les aspects du changement global : mécanismes du climat, vulnérabilité des écosystèmes, des ressources et des sociétés. En outre, l'offre de formation reste souvent très peu interdisciplinaire. On s'aperçoit que le monde des associations, des collectivités locales et des entreprises a de plus en plus besoin d'experts sur les problématiques du bilan de carbone et de l'azote, des stratégies d'adaptation et d'atténuation du changement climatique, sur les pollutions émergentes. Cela implique une formation alliant les sciences naturelles et sociales. Il faut donc décroiser les formations traditionnelles.

Le vivier de chercheurs de ce domaine reste néanmoins important puisque sur la période 2009-2010, plus de 50 candidats se sont présentés sur les thématiques liées aux changements globaux.

## 2.2 BIODIVERSITÉ, BIOLOGIE DE LA CONSERVATION

En France, et au CNRS en particulier, la communauté scientifique travaillant sur les questions de la biodiversité est forte de sa production écrite, avec un important rayonnement international. Les champs de recherches couvrent tant l'évolution et l'organisation de la biodiversité, que la fonction de la biodiversité dans la qualité et la productivité des systèmes écologiques. Les approches mises en œuvre sont diverses, depuis la théorie et la modélisation, jusqu'aux nécessaires observations directes et expérimentations.

### Les grandes interrogations de la société par rapport à la biodiversité

Les premières interrogations sur la biodiversité portent sur les mécanismes qui en sont à l'origine et qui agissent pour son maintien. Plusieurs hypothèses sont développées pour y répondre, et des expérimentations sont réalisées pour les tester, ainsi que pour en tirer des règles de gestion pratique (théorie de la spéciation, théorie neutre de la biodiversité, biologie de la conservation, dynamique des populations/ espèces, interactions entre espèces). Ces champs d'investigation couvrent les recherches en écologie, évolution, phylogénie et paléontologie.

D'autres questions portent sur les conséquences que vont avoir les changements globaux sur la biodiversité, en particulier les invasions biologiques, maladies émergentes, destructions d'habitats, et changements climatiques. Ici, les recherches portent sur le fonctionnement des systèmes écologiques, avec notamment la quadrature du cercle entre diversité et productivité des agrosystèmes. Outre son importance fondamentale, les implications de ce champ sur l'agronomie et l'aménagement écosystémique des territoires sont importantes. Un autre champ particulier d'application qui se révèle de plus en plus pertinent est centré sur la biodiversité en ville, les services rendus, son

utilisation, ses risques (espèces nuisibles, ou utilisation anthropique d'une biodiversité introduite, potentiellement envahissante), sa perception par les citoyens, les implications de cette perception sur la biodiversité elle-même.

D'autres champs de recherches portent sur la crise actuelle de la biodiversité, aussi appelée la «6<sup>e</sup> extinction» : comment lutter contre la baisse rapide et drastique de la biodiversité? Il apparaît également nécessaire de se demander quel niveau de la biodiversité est nécessaire, ou au moins le plus urgent, à préserver (espèces ou populations, diversité neutre ou fonctionnelle), et comment orienter les efforts pour qu'ils soient le plus efficaces (espèces clés de voûte). Pour cela, il faut comprendre quelles sont les conséquences (biologiques, économiques, sociologiques) des pertes de biodiversité, en particulier en fonction du type de biodiversité. Ce domaine oblige à croiser les regards entre évolution, écologie, philosophie, et sciences politiques.

Il est ensuite nécessaire de réfléchir sur le type de biodiversité qui est à préserver en priorité, et quelles sont les meilleures méthodes pour y parvenir. Ce champ de recherche concerne l'écologie mais aussi la sociologie, avec des questions du type : à quoi les citoyens sont-ils prêts à renoncer pour préserver la biodiversité, en particulier en terme de changements de comportement? Quels arguments les touchent? Comment équilibrer les services rendus (loisirs, alimentation, industrie) avec la préservation?

Toutes ces questions impliquent de pouvoir quantifier la biodiversité et ses changements. Or nous manquons encore d'indices et de méthodes pour mesurer cette biodiversité. Il faut réfléchir à des outils de mesure pertinents (code barre ADN, nombre d'espèces, variabilité génétique), ainsi qu'aux meilleurs indices de mesure. Ce domaine, bien qu'ancien, tarde à produire des indicateurs qui ne soient pas réservés aux seuls scientifiques, spécialistes de surcroît, en raison de l'intelligibilité et de la maniabilité des méthodes d'estimation de la biodiversité. La gestion durable des ressources naturelles et l'aménagement écosysté-

mique impliquent des stratégies et des outils faciles à appliquer techniquement et juridiquement.

Les aspects juridiques de la biodiversité (réglementations aux échelles nationale, régionale et mondiale) sont également à explorer, en lien avec les notions de services rendus par la biodiversité, de valorisation économique de la biodiversité, et de propriété de la biodiversité.

Il est enfin nécessaire d'explorer les liens entre biodiversité et agriculture/élevage, et notamment les impacts de l'agriculture et de l'élevage sur la biodiversité, le maintien des ressources génétiques pour l'agriculture/élevage, et les pratiques à recommander pour le développement durable. Des questions délicates sur la création de biodiversité (OGM, introgression,..) devront croiser les disciplines de l'écologie, la sociologie, et le droit.

### **Aux frontières de la biodiversité**

La biodiversité est une question de civilisation qu'on peut qualifier d'universelle ou d'intemporelle. En effet, si les écologues et les biologistes peuvent logiquement apporter des éléments principes pour quantifier et déterminer les aspects évolutifs et fonctionnels de la biodiversité, les sciences de l'Homme et des sociétés contribuent à analyser la place de la biodiversité dans les relations de l'humanité à cette fraction significative de la qualité et de la fonctionnalité de l'environnement. Les questions épistémologiques sont importantes et nécessitent une démarche appropriée de spécialistes pour les mettre en œuvre. Les sciences de la matière concourent objectivement à apporter une démarche rationnelle et méthodique pour explorer le signal spatial et temporel, l'amplitude des réponses entre biodiversité et les variables physiques et humaines interactives. Enfin, les sciences de l'ingénieur sont sollicitées pour proposer des solutions stratégiques et des procédés technologiques pour réguler et maintenir la biodiversité pour ce qu'elle est, mais aussi pour ce qu'elle représente de services pour l'humanité.

### **Les faiblesses de la communauté française**

On peut constater objectivement une hétérogénéité importante en terme de répartition tant des unités que des effectifs de chercheurs et enseignant-chercheurs, avec deux pôles majeurs, sur l'Île de France et le Languedoc-Roussillon. Cette hétérogénéité se traduit mécaniquement par des concentrations de centres de formation sur quelques universités ou campus régionaux qui hébergent l'essentiel des potentiels de recherches et de formation au niveau 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycle académique. Cette situation est contradictoire avec les besoins de formation au 1<sup>er</sup> cycle académique avec des enseignants et formateurs qui se retrouvent dispersés et partiellement isolés sur le territoire. Cette dispersion génère une érosion potentielle des capacités cognitives et des synergies, et des capacités à retransmettre les avancées de la recherche dans le domaine de la biodiversité vers la société, vers les collectivités locales et vers les entreprises. Cela est particulièrement dommageable à l'heure où les collectivités locales et les entreprises doivent remplir des cahiers des charges précis dans ces domaines, et se retrouvent le plus souvent sans appui adéquat.

Même si les chercheurs dans le domaine de la biodiversité se retrouvent essentiellement en section 29, l'approche interdisciplinaire de la biodiversité, que soutient la CID45, dispose néanmoins d'un vivier relatif puisque plus de 15 chercheurs ont candidaté entre 2009 et 2010 (sans affichage particulier dans ce domaine).

## **2.3 SOCIÉTÉS, HOMMES ET ENVIRONNEMENT**

L'homme modifie sa posture par rapport à l'environnement, il se replace au sein de l'environnement en interaction avec lui et non plus dans une posture d'exploration et d'exploitation. Les processus anthropiques se sont accentués depuis le XIX<sup>e</sup> siècle : homogénéisation, artificialisation et simplification des paysages,

des cultures, des exploitations, impacts sur les écosystèmes, en particulier avec le changement climatique. Les interactions entre les sociétés et leur environnement sont difficiles à observer du fait de leurs caractéristiques spatiales et des facteurs d'échelles associés, du recul temporel nécessaire à leur compréhension et des implications sociales et économiques. Ces relations Homme/Milieu associant l'individualité et la société tour à tour se sont inscrites de tous temps dans les paysages et leurs transformations, dans les pratiques et leurs développements au sein de choix de société.

### **La demande sociale**

La seule façon de faire prendre conscience et de faire évoluer la position des sociétés par rapport à l'environnement, est de renforcer l'appropriation sociale et politique des enjeux, des évolutions de la connaissance et des pratiques (paysages, protection etc.) et la prise en compte des paradoxes sous jacents au développement. Dès lors comment positionner les recherches dans le domaine? Quelles articulations favoriser avec les acteurs de terrain? Comment les situer dans les discours actuels?

La complexité croissante des questions qui se posent actuellement au cœur des interactions Homme/Milieu requière une multiplicité de compétences disciplinaires et des développements conceptuels et méthodologiques co-construits. Ces efforts passent par un apprentissage de travail en commun, la formalisation commune des questions et la mise en place de réelles stratégies d'interdisciplinarité. Des moyens, des supports de développement et d'enrichissement de connaissance, des plateformes doivent être mis en place pour faciliter ces travaux exploratoires débouchant sur une plus grande compréhension des socio-écosystèmes (SES) et de leurs enjeux à venir. Ces actions communes doivent aussi se faire en direction des décideurs, ce qui met le chercheur en prise avec l'actualité du moment (par exemple le Grenelle de l'Environnement).

Si les recherches se trouvent plongées peu ou prou dans des contextes politiques,

les choix politiques d'aménagement du territoire, de régulation, de protection des espèces... doivent prendre en compte à la fois les héritages, les rétroactions potentielles (avec ou sans connaissance des décalages temporels associés) et les non-choix possibles : par exemple une ville compacte revient à moins d'espace utilisé et moins de circulation (moins d'émission de polluants etc.), mais cette configuration urbaine entraîne plus d'îlots de chaleur, plus de risque de canicule etc. Ces situations de délicats équilibres nécessitent la mise au point de méthodes d'analyse et de comparaison des scénarios de développement qu'il est possible d'envisager et de proposer aux acteurs de terrain sans faire l'impasse sur la complexité du problème.

Devant les pressions exercées par l'Homme sur son milieu, des possibilités de conservation, mais aussi de compensation ont vu le jour. La conservation des espaces naturels protège mais sanctuarise aussi, ce qui peut être un frein au développement même durable. Les choix de compensation quant à eux s'appuient sur des principes de développement contraint mais permettant de procéder à des choix après évaluation des effets d'une action sur l'environnement ; mais là encore des choix d'application stricte peuvent s'avérer contre-productifs.

### **L'apport de l'étude du passé**

Dans un tel contexte, l'étude diachronique des interactions Homme/Milieu sur la longue durée reste fondamentale et doit être mobilisée au service d'une prospective environnementale. L'enjeu est ici de fournir non seulement une reconstitution des processus et des dynamiques propres à l'anthropisation des écosystèmes (chronologie, impacts, modalités d'exploitations des ressources, poids des héritages, résiliences), mais également les bases et les données indispensables aux modélisations et à l'établissement de scénarios prédictifs pour les acteurs et gestionnaires de l'environnement.

Dans ce domaine, de nombreuses unités de recherches et une importante communauté

scientifique relevant des sections 31, 20 ou 39 ont acquis une expérience et une notoriété internationalement reconnue. Les démarches mises en œuvre, qui se situent à l'interface des SHS et des sciences naturelles, sont désormais – et depuis l'impulsion donnée par les programmes du PIREN et du PEVS – largement interdisciplinaires et articulent géographie, écologie historique, histoire socio-économique et agraire, archéologie, anthropologie, écologie au sein d'approches intégrées.

Les objectifs de ces recherches sont multiples. Pour les périodes les plus anciennes les études se focalisent sur l'étude des interactions entre évolution des premières sociétés humaines et changements climatiques. À partir de la néolithisation, sont principalement étudiés les processus de mise en place des anthroposystèmes. À ce titre, les questions de vulnérabilité ou d'adaptabilité sociales face aux variabilités naturelles (en particulier climatique) alimentent les études visant à la reconstitution conjointe et multiscalaire des dynamiques sociales et climatiques sur des fenêtres chronologiques déterminées (Âge du Bronze, période Médiévale...) ou sur des crises majeures (Collapse Maya, de la société Viking Groenlandaise...).

Si les acquis sont importants, l'abondance des données produites impose de mettre rapidement en place des dispositifs nationaux adaptés à la centralisation et à l'exploitation de ces informations, dont la diversité et la dispersion confine parfois au gaspillage. Des efforts doivent également être consentis sur l'acquisition de référentiels actuels. Les observatoires de terrain joueront un rôle indéniable dans ce domaine (voir section 3). Un des enjeux majeurs se situe toutefois dans le développement des analyses modélisatrices rétrospectives applicables à la réalisation de scénarios prospectifs. Dans cette optique une amélioration quantitative des reconstitutions reste indispensable en matière de paysages, d'occupation, d'usages, de dégradation des sols, de démographie...).

## Les méthodes et outils

Les développements de méthodes et d'outils permettant de prendre en compte les

interactions Homme/Milieu ont été importants ces dernières années. Associant à la fois l'observation, la reconstitution, l'analyse et la simulation, ils tentent d'identifier et de caractériser les interactions au travers de modèles non seulement des enveloppes physiques (vivant, atmosphère, hydrosphère etc.) mais aussi des populations, par l'intermédiaire des simulations de jeux d'acteurs (systèmes multi-agents), d'aide à la décision ou de management environnemental. L'information géographique (bases de données, imagerie satellite ou aéroportée) est devenue, quelles que soient les disciplines, un élément essentiel de l'acquisition de connaissance, de l'analyse de l'espace ou de sa représentation. Des outils tels que les systèmes d'information géographique sont particulièrement intéressants dans les approches pluridisciplinaires, permettant l'appréhension des phénomènes spatialisés, facilitant la confrontation des points de vue, œuvrant à la médiation des confrontations.

## Les faiblesses de la communauté française

Les interactions Homme/Milieu sont prises en compte par de nombreuses disciplines ; la variabilité se situe au niveau des échelles d'étude et des processus analysés, des méthodes et moyens d'observation et des temporalités induites (prises en considération). Les problématiques Homme/Milieu sont dès lors souvent sectorielles, de par la difficulté de coupler les approches, les échelles et les modèles d'analyse. Les passerelles fournies par les questionnements sociétaux nécessitent la redéfinition des problématiques scientifiques, l'échange et la disponibilité envers les acteurs locaux tout en conservant des approches garantes de la qualité scientifique. La nécessité de créer des espaces, des formes de travail collaboratif où la pluridisciplinarité se frotte à la multiplicité des acteurs, mêlant savoirs d'experts et savoirs profanes est de plus en plus d'actualité.

Même si, institutionnellement, des efforts sont nécessaires pour aller vers une interdisciplinarité plus forte, le grand nombre de candi-

stats en 2009-2010 (plus de 50) montre un dynamisme intéressant chez les jeunes chercheurs. Il faut néanmoins considérer que ce vivier a été attiré par plusieurs colorriages.

## 2.4 SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

### Santé, travail et environnement

L'articulation et les rapports entre santé, travail et environnement constituent une problématique privilégiée au sein de la CID 45 qui est appelée à s'affirmer encore en raison de l'acuité des problématiques qu'elle soulève.

On peut sérier différentes questions : (1) quels sont les risques pour la santé individuelle et collective liés à l'environnement ? (2) que nomme-t-on ici « environnement » ? à quelle échelle se situe-t-on ? (3) comment définit-on les « catastrophes naturelles » ? (4) Quel est l'impact sur la santé de l'activité humaine et comment le mesure-t-on ? (5) Comment articuler conditions de vie et conditions de santé : à travers quels indicateurs et outils de mesure ? Qu'est-ce que la « qualité de vie » pour une personne, une population ? (6) Y a-t-il des groupes particuliers de population qui sont plus à risque que d'autres ?

Il est donc essentiel que la richesse des apports des différentes disciplines relatives aux questions de santé publique soit reconnue et mise en valeur de façon plus poussée. La visibilité des interactions existantes entre progrès de la biomédecine et applications sociétales soit être renforcée par un accroissement des effectifs scientifiques et des moyens.

### Enjeux éthiques et juridiques des pratiques médicales

Quelques pratiques médicales contemporaines attirent l'attention de par leur nature, le savoir et les outils biotechnologiques qu'elles mobilisent, ainsi que par leur impact social et politique. Elles nécessitent des travaux de

recherche, pour développer ou approfondir une véritable connaissance à leur égard, inventer et formuler des indicateurs et des marqueurs qualitatifs, élaborer une réflexion critique et normative à leur sujet. Parmi les pratiques médicales, on peut citer (1) celles liées à l'amélioration (« *enhancement* »), (2) celles qui mettent en jeu la question de la marchandisation du corps, comme la greffe d'organes (« *commodification* »), (3) celles qui semblent rompre avec « le cours naturel des choses », comme la médecine de réanimation ou de procréation assistée, (4) ou encore celle qui est autant sinon plus une médecine d'accompagnement qu'une médecine de soin (par exemple celle qui prend en charge une population de plus en plus vieillissante ou la médecine palliative des personnes en fin de vie).

### L'exemple du vieillissement comme objet de recherche

Actuellement, nos conditions de vie permettent de vieillir en bonne santé pendant de plus en plus d'années. Face à ce constat, la société se doit de repenser ses approches vis-à-vis du vieillissement et anticiper les bouleversements socio-économiques et sanitaires. Par exemple, une considération différente de l'urbanisation s'impose afin de réduire les différences générationnelles. En outre, puisque que les traitements palliatifs actuellement disponibles présentent des limites dans leur efficacité, il est impératif de (1) développer les recherches sur les mécanismes biologiques qui contrôlent le vieillissement, (2) investir sur les démarches prédictives du processus de vieillissement à travers la validation d'indicateurs biologiques, psychologiques et sociologiques du vieillissement, et (3) mettre à profit les connaissances dans les trois domaines précités afin de définir des consignes de vie adaptées aux situations individuelles.

L'ensemble de ces pratiques médicales a fait naître une réflexion « bioéthique » particulièrement vivante et a fait émerger dans l'espace public des questionnements nouveaux. Comment la société civile prend-elle en

charge cette réflexion? Quelles instances (des jurys de citoyens aux comités d'experts en passant par les associations de patients) jouent un rôle normatif, voire législateur? Quelle place doit occuper, dans ce dispositif, le chercheur en sciences humaines et sociales?

## **L'accès aux soins et l'industrie de la santé : question politique majeure**

Quelle que soit la pratique médicale envisagée, la question de l'accès aux soins est un enjeu crucial. À l'heure actuelle, les théories de la justice conçues, modélisées et analysées par la philosophie, la sociologie, l'économie normative et les sciences politiques, proposent de multiples conceptions des principes à promouvoir pour déterminer l'accès aux soins : peut-on trancher entre ces conceptions? En amont, ne faut-il pas mettre en cause la perception d'un accès large aux soins comme un coût et privilégier une analyse en termes d'investissement? La distinction entre médecine de soin et médecine de convenance est-elle pertinente dans la réflexion sur l'accès aux soins, et si oui, jusqu'à quel point peut-elle être utilisée pour réguler celui-ci? Comment distribue-t-on des ressources rares? Par ailleurs, comment mesurer l'impact des difficultés d'accès aux soins liées à l'accessibilité géographique des institutions de santé et celui des différences ou inégalités socio-culturelles pour la santé des personnes (l'exemple des habitudes alimentaires est typique de ce genre de problématique)?

On peut poser cet ensemble de questions pour toute aire géographique, politique ou culturelle. L'Europe de la santé peut en particulier retenir l'attention car elle est insuffisamment connue, alors qu'elle représente une réalité de plus en plus forte (notamment en raison des migrations des diplômés, côté médecins et des déplacements d'un pays à un autre pour raison de santé, côté patients).

Enfin, il est nécessaire d'aborder à l'échelle internationale la question de l'accès aux soins du point de vue des rapports nord/sud, de l'accès aux soins des populations migrantes, réfugiées, demandeurs d'asile, à

l'égard de maladies qu'on croyait éradiquées et qui émergent de nouveau, notamment en contexte de pauvreté.

## **La place de la recherche française**

En sciences humaines et sociales, il existe en France une tradition forte en sociologie, en anthropologie et en philosophie de la santé et des choix privés ou collectifs en matière de santé, de procréation et de mort, d'allocation des ressources rares et des principes de justice distributive qui fondent les systèmes de protection. La recherche s'oriente autant en un sens descriptif que normatif et prescriptif et elle répond de plus en plus, suivant en cela un mouvement international, à l'injonction de la pluridisciplinarité. Même si la bioéthique vient d'Outre-Atlantique (années 1970) et qu'il reste encore beaucoup à faire pour la légitimer comme objet des sciences humaines et sociales, il y a un dynamisme incontestable de ce côté là, que ce soit au sujet des pratiques médicales et de la relation médecin/patient qu'au sujet de la recherche clinique et de l'expérimentation. La question de la santé publique est par ailleurs également assez travaillée, pas seulement du côté de la médecine où elle est une discipline enseignée mais aussi chez les politistes et les juristes. On pourrait appeler de nos vœux une réflexion plus critique à son égard, mais il est incontestable que depuis l'émergence des lois de bioéthique (premières lois votées en 1994, révisée en 2002 et en cours de révision de nouveau) au moins, toute une réflexion juridique, éthique et institutionnelle a émergé, relative au droit français et à ses fondements, et en droit comparé.

Trois défis doivent être relevés : celui de mener des travaux sur les pratiques médicales ou la recherche clinique qui incluent plus systématiquement la question de la globalisation et celle des rapports nord-sud ; celui d'une articulation plus riche entre la recherche sur la santé et la recherche sur l'environnement, les deux étant souvent de fait liées dans les pratiques ; enfin, il est essentiel que la richesse des apports des différentes disciplines relatives aux ques-

tions de santé publique soit reconnue et mise en valeur de façon plus poussée : l'appel à l'interdisciplinarité est ici crucial pour aborder de façon pertinente les objets « santé et environnement », mais il y a là une exigence qu'il n'est pas facile de satisfaire, tant les langues parlées par les différentes disciplines et les méthodes de recherche et d'évaluation diffèrent.

La visibilité des interactions existantes entre progrès de la biomédecine et applications sociétales doit être renforcée par un accroissement des effectifs scientifiques et des moyens, y compris pour permettre à la recherche française une meilleure visibilité à l'échelle internationale.

Nos statistiques sur les candidatures 2009-2010 montrent qu'il y a potentiellement un vivier important dans ce domaine (plus de 20 candidats). Néanmoins un certain nombre de ces candidats auraient pu se présenter dans leur section d'origine, au vu d'une valeur ajoutée interdisciplinaire pas toujours manifeste, mais il est vrai en retour que la nouveauté (relative) de leurs objets peut ne pas être un atout dans ces sections d'origine et ce fait doit donc être pris en compte dans la politique de recrutement de la CID 45.

## 2.5 MISE EN ŒUVRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le développement durable (DD) est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures, de répondre à leurs propres besoins ». Le concept de développement durable apparut dans les années 1980 correspondait à une double prise de conscience que les stocks de ressources naturelles disponibles étaient limités et que les processus de développement induisaient des externalités négatives (déchets, pollution, bruit, etc.). Ces deux aspects pouvaient remettre en cause, à terme, la durée de la croissance et la poursuite du développement. Le « Brundtland Report », également connu sous le nom de « Our Common

Future » popularise ce concept, à partir de 1987. La durabilité concerne la protection de l'environnement, la croissance économique et la justice sociale.

Dès qu'on parle de DD, un certain nombre de questions s'imposent : comment traiter, en termes de politiques publiques, les modalités de prévention et de précaution, ainsi que les possibles dommages irréversibles ? Quels sont les points de non-retour de la qualité physico-chimique de l'environnement, de la biodiversité, les seuils de réversibilité des systèmes qu'ils soient « naturels », anthropisés ou anthropiques ? Quels sont les liens entre les différents risques environnementaux, les conflits sociaux et la violence urbaine ? En quoi les situations de risques et d'incertitudes bouleversent-elles les modalités de l'action collective, opérant un passage de la prévention à la précaution ? En quoi modifient-elles l'acceptabilité sociale et le rapport à l'expertise ?

### Les champs d'investigation

#### L'eau

À l'échelle des surfaces continentales et interfaces (estuariennes et zones côtières) et des océans la durabilité est basée sur le retour (plus rarement le maintien) d'une bonne qualité de l'eau en quantité suffisante. La réduction de la pollution des eaux est un enjeu majeur pour la protection de la santé des écosystèmes (eutrophisation, biodiversité) mais aussi de la santé humaine. Il apparaît désormais clairement, grâce aux résultats de modélisation, que la mise en place de la directive cadre européenne (DCE) sur l'eau ne permettra pas de retrouver une qualité acceptable des eaux de surface tant à court terme qu'à l'horizon 2050 dans les régions où les aquifères ont un temps de résidence importants. ?

#### Les sols

Les problématiques scientifiques dans le domaine de l'eau et des sols doivent désormais

être liées. La qualité (et la quantité) d'eau dépend bien plus des pollutions agricoles que des eaux résiduelles urbaines. Les pratiques agricoles et environnementales doivent s'orienter sur des voies radicalement différentes. Il semble, à travers les rares expériences d'une agriculture écologique, que la restauration des sols abimés soit possible, à condition que des recherches soient menées rapidement sur les qualités des matières organiques dans les sols, condition au maintien de leur structure. Ceci nécessite donc de maintenir la diversité des gènes, des organismes, et de leurs habitats, mais aussi des paysages.

### **Les nouveaux biomes**

Le terme « biome » appliqué à la ville ou à l'espace urbanisé, géographiquement localisé définit des écosystèmes caractérisés par les interactions entre l'Homme (société) et son milieu (bâti et vivant). Des travaux ont été récemment lancés pour rendre les villes durables et résoudre ses apparentes contradictions (par exemple, compacte et champêtre). La ville peut être durable si on y applique le concept Ville-Santé, si on définit la santé comme un bien-être physique, mental, social, ce qui implique autant une interdisciplinarité scientifique qu'une volonté politique. Les systèmes côtiers sont d'autres biomes également très vulnérables en raison des dérèglements climatiques, vulnérabilité qui va s'accroître avec l'augmentation de la pression humaine, et les pollutions engendrées.

### **L'énergie**

Les énergies tirées essentiellement des éléments (terre, eau, air, feu, soleil) sont renouvelables si elles sont effectivement renouvelées à l'échelle d'une vie humaine et si elles sont cohérentes avec un développement durable (rationalisation de la consommation par ex.). Une typologie classique présente les énergies renouvelables selon leur degré de maturité technique. La France privilégie la production d'électricité et les énergies renouvelables

offrent toute une gamme de puissances, allant de la production individuelle à la production centralisée. Mais ces sources d'énergie présentent souvent une caractéristique commune, à savoir la variabilité *-souvent non prévisible-* de leur production. Le stockage de l'énergie reste donc un enjeu majeur.

### **L'ingénierie écologique**

La manipulation *in situ* de systèmes écologiques (de l'individu aux écosystèmes) dans un contexte écosystémique, la gestion de milieux et la conception d'aménagements durables, la réhabilitation des systèmes complexes dans lesquels interviennent des acteurs impliquent un réel cadre interdisciplinaire mais aussi un dialogue entre les scientifiques, la demande citoyenne, et les demandes institutionnelles et politiques. L'ingénierie écologique doit être couplée à une démarche d'analyse de l'évaluation des services écosystémiques. La dimension éthique de la réflexion ne peut être différée, pour ne pas se réfugier derrière la technologie. Par exemple, s'il est techniquement possible de construire des grands barrages, ou des centrales nucléaires pour faire face au problème d'énergie, on sait que la durabilité de ces grands ouvrages est limitée.

### **La chimie durable**

La chimie, secteur économique important, est mal perçue en raison des problèmes de pollution qu'elle a pu et peut engendrer, et de l'appauvrissement en ressources non renouvelables (ex : hydrocarbures fossiles) dont elle est à l'origine. Le développement de catalyseurs plus performants et réutilisables et la promotion de la photochimie sont sans doute des voies à emprunter. La création, l'utilisation de nouvelles matières premières devraient par ailleurs être une priorité, en s'interrogeant systématiquement sur les déplacements des pollutions engendrés, par la production (cf. développement durable). L'origine des ressources de la chimie, leurs transferts, transport de produits et matériaux mais aussi stockage et

transformations doivent aussi faire l'objet d'étude approfondies du type « cycles de vie des matériaux et des produits » et « empreintes environnementales ». La chimie durable doit donc se nourrir d'approches historiques, et géopolitiques.

## Les outils et méthodes

### Les indicateurs

Construire des représentations synthétiques de la réalité autour de nous est une nécessité des processus de décision de nos sociétés. Répondre à cette demande croissante de construction d'indicateurs, c'est aussi constater qu'ils sont des représentations plus ou moins fiables d'une réalité, mais pourtant des outils pour conduire une politique. La conception, la mise en oeuvre et l'évaluation d'un indicateur quelconque est donc un processus dans lequel il faut établir *a priori* qui utilise l'indicateur, à quel fin, pour mener quelle politique et avec quels résultats attendus. Le déficit scientifique est la conception d'une méthodologie pour la construction d'indicateurs de phénomènes sociaux, environnementaux et économiques complexes, vus comme un outil d'aide à la conception, la mise en place et l'évaluation des politiques publiques notamment dans le cadre du développement durable.

### L'informatique et le développement durable

La conception et la mise en oeuvre des politiques de développement durable interpellent l'informatique sur des sujets de recherche tels que (1) les méthodes d'aide à la décision et la construction d'indicateurs, (2) le traitement des très grande masses de données, (3) la construction d'entrepôt de données et de méthodes d'extraction des connaissances, (4) la conception de méthodes de fusion d'information d'origine hétérogène, contradictoire, incertaine, (5) le développement de méthodes d'optimisation spécifiques, etc. Par ailleurs, il est nécessaire de

débatte sur l'impact que le concept de développement durable peut avoir dans le développement scientifique et technologique de l'informatique (efficacité énergétique, recyclage, durabilité du matériel, consommation de ressources, circulation, utilisation, manipulation et diffusion de l'information).

### La place de la recherche française

Des recherches interdisciplinaires ont été initiées en France depuis plus de 20 ans sur le plan académique entre les historiens et les biogéochimistes, entre les hydrologues et les géographes, entre la géophysique et les archéologues, etc. et ont permis d'aider à la mise en place de politiques publiques (voir par exemple la ZA Seine). Avec nos savoirs académiques interdisciplinaires, qu'il faut continuer d'enrichir, il est important aussi de se tourner vers les savoirs formalisés d'ingénieurs, pour progresser dans les domaines de restauration, remédiation, en impliquant aussi les citoyens concernés. Dans de telles perspectives, des méthodes de sciences participatives doivent se développer, en parallèle avec des outils de l'information spatialisée et des modélisations mathématiques. Les verrous les plus importants sont ceux des politiques nationales et européennes, les directives et les réflexions étant fortement biaisées par des lobbies qui dépassent les scientifiques, les citoyens et parfois les gestionnaires. C'est le cas actuellement dans le domaine de l'agriculture, et il est nécessaire que le CNRS s'investisse dans ces problématiques aux côtés des autres organismes (INRA, IFREMER, CEMAGREF, IRD, CIRAD...). Cette collaboration inter-organismes est une richesse française, requise pour relever les défis du XXI<sup>e</sup> siècle, en termes de perceptions de la disponibilité, qualité et origine des ressources (eau, nourriture), des usages et des cultures, des coûts-bénéfices des mesures à prendre.

Le vivier est relativement important avec plus de 25 candidats dans ce domaine en 2009-2010, mais il concerne surtout l'écotoxicologie qui disposait d'un coloriage en 2009 et l'écologie chimique qui disposait d'un coloriage en 2010.

## 3 – LES MOYENS

### 3.1 LES OBSERVATOIRES ET SITES INSTRUMENTÉS

Le CNRS dispose d'outils opérationnels permettant l'observation de nombreuses variables environnementales sur le terrain : OSU, Réseaux des Bassins Versants, observatoires de recherche en environnement (ORE ou SOERE), zones ateliers (ZA), Observatoires Hommes-Milieus (OHM).

*Pourquoi un observatoire?* : pour observer un phénomène, des modifications soudaines ou lentes, comprendre les réactions, les mécanismes de réponse, de transfert, de diffusion, maîtriser ou contrôler l'impact, la rétroaction. L'observation à long terme est nécessaire à la compréhension des processus (effets différés). Cette dernière peut mener à des modèles analogiques ou numériques, pouvant ensuite valider ou suggérer des modifications dans les tâches d'observation, métriques et fréquences.

#### Difficultés et besoins

Les observatoires sont des dispositifs coûteux et complexes à mettre en œuvre et à maintenir. Les structures sont nombreuses et parfois redondantes ; il faut donc davantage mutualiser. Il y a peu de coordinations entre structures dédiées à l'environnement. Nous avons un besoin de synergie entre observatoires de recherche et observatoires dits opérationnels, de coordination avec les organismes territoriaux, les décideurs politiques.

Pour la raison évoquée ci-dessus, trop peu de travaux prennent en charge une réflexion sur une construction de dispositifs d'observation des activités humaines replacées au niveau du territoire. Les dispositifs actuels sont soit une entrée thématique, donc partielle, appliquée à de vastes territoires, soit des pratiques temporaires d'observation liées à des programmes de recherche-intervention. Or, la

gestion à long terme des ressources (sols, eaux, air, forêts..) ne sera améliorable qu'en maîtrisant deux ensembles d'informations : (1) les liens entre activités humaines et qualité des ressources impactées, (2) les liens entre les dynamiques d'activités humaines et leurs déterminants

Pour suivre les effets différés et distants, il faut assurer le long terme et mettre en place des systèmes d'information géographique. En ce qui concerne la gestion des données, il y a d'énormes besoins liés à la complexité des systèmes. Ces données doivent être valorisées, mais cela ne peut se faire sans se poser la question : pour qui et par qui ?

Les besoins humains sont donc nombreux, pour les instrumentations, la gestion des données, l'animation scientifique des observatoires. Puisqu'il s'agit d'un nouveau métier et d'une carrière différente de ce qui existe, une réflexion pourrait être menée pour la création d'une BAP « systèmes d'observation », qui recruterait des spécialistes en observation, qui seraient capables de mobiliser, d'agréger des acteurs, chercheurs et non-chercheurs autour d'une même question scientifique, et donc de stimuler la valorisation des données.

#### Les différents instruments

##### **Les observatoires, structures nationales**

– les Observatoires Hommes-Milieus (OHM), un outil d'interdisciplinarité au service de la connaissance de l'environnement et des interactions hommes-milieus.

– les Zones Ateliers (ZA), pour des recherches interdisciplinaires sur l'environnement et les anthroposystèmes en relation avec les enjeux sociétaux.

– le réseau des bassins versants, axé sur la mesure des paramètres physiques, géologiques, géochimiques, hydrologiques.

– les ORE-SOERE, pour apporter connaissances et prévisions nécessaires pour com-

prendre le fonctionnement, conserver, protéger et gérer les milieux, les écosystèmes, leur biodiversité, pour mieux comprendre les interactions des systèmes humains et naturels ; il est important qu'ils soient pluridisciplinaires.

### **Les écotrons, les sites instrumentés, le laboratoire**

Passer de l'observation des effets sur des entités définies à la compréhension des processus à un niveau d'intégration supérieur nécessite un effort inédit couplant l'expérimentation *ex-situ* et *in-situ* à la modélisation.

Les écotrons peuvent être considérés comme intermédiaires entre expérimentations de laboratoire et sites instrumentés. C'est l'ensemble de ces trois composantes qui permet la hiérarchisation des processus, nécessaire à une modélisation rigoureuse.

### **Vers des observatoires inter-disciplinaires**

Trop peu de travaux prennent en charge une réflexion sur une construction de dispositifs d'observation des activités humaines replacées au niveau du territoire. Les dispositifs actuels sont soit une entrée thématique, donc partielle, appliquée à de vastes territoires, soit des pratiques temporaires d'observation liées à des programmes de recherche-intervention. Or, la gestion à long terme des ressources (sols, eaux, air, forêts..) ne sera améliorable qu'en maîtrisant deux ensembles d'informations : (1) les liens entre activités humaines et qualité des ressources impactées, (2) les liens entre les dynamiques d'activités humaines et leurs déterminants.

Les observatoires doivent être intégrés dans des réseaux nationaux et internationaux (un exemple est le LTER, Long-term Ecological Research, qui intègre les ZA), mais aussi être localement en interaction forte avec les collectivités territoriales et EPA, et en interaction forte avec les systèmes de recherche et d'expérimentation *ex-situ*.

## **3.2 INTERDISCIPLINARITE ET ÉVALUATION**

L'interdisciplinarité exige la mise en place de tout un éventail de stratégies du lien interdisciplinaire, plus ou moins marqué. Di Castri propose une terminologie exprimant les liens entre les disciplines. De la multidisciplinarité où plusieurs disciplines interviennent sans interactions à l'interdisciplinarité où les interactions et la coordination découlent de la complexité du problème à étudier. Beaucoup se cantonnent à la pluridisciplinarité dans des projets où plusieurs disciplines interviennent, sans coordination, permettant quelques interactions.

De l'interdisciplinarité simple (liens entre disciplines des sciences de la nature par exemple) à l'interdisciplinarité élargie (liens entre les disciplines des sciences de la nature, aux sciences sociales) est un mouvement qui semble être à contre-temps de l'hyper-spécialisation disciplinaire. Toutefois pour aborder un même problème souvent plus proche de la demande sociale, ou tout au moins répondant à des problématiques de société (environnement, pollutions diverses, concertation et évaluation etc.), l'interdisciplinarité s'impose.

En effet, avec des questionnements qui évoluent au cours des travaux de recherche communs, il n'est pas rare que l'appropriation de questions disciplinaires par une autre discipline conduise à redéfinir un objet ou une problématique de recherche.

### **Les formes de l'interdisciplinarité (1)**

On peut définir un gradient d'interdisciplinarité selon la force des liens entre les disciplines :

– choix d'un terrain commun facilitant les interactions : création d'un réservoir d'information puis éventuellement rencontre aléatoire de discipline (multidisciplinarité) ;

– division du travail planifié à partir d'une question initiale : association de disciplines qui concourent à une réalisation commune, mais sans que chaque discipline ait à modifier sensiblement sa propre vision des choses et ses propres méthodes (pluridisciplinarité) ;

– constitution d'un référentiel descriptif de dispositifs d'information et d'une mémoire commune : étendre la part commune des moyens techniques et scientifiques mis en œuvre par les disciplines associées (typologie, vocabulaire commun, informatisation systématique des données...);

– interaction organisée autour d'un arbre évolutif de questions communes et de la coordination soutenue des démarches disciplinaires. Cela implique de créer l'armature du programme de recherches par le collectif de chercheurs avec ré-évaluation périodique. (interdisciplinarité).

– la visée de l'intégration par le recours à un métalangage théorique unifié comme celui de la théorie des systèmes : élaborer un formalisme général et précis pour permettre d'exprimer dans ce langage unique les concepts, les préoccupations, les contributions d'un nombre plus ou moins grand de disciplines.

– la genèse d'une nouvelle discipline nécessite un affermissement des concepts et l'obtention de résultats cumulatifs. Sur le plan institutionnel, cela implique la formation de communautés scientifiques, des moyens de publication, des lieux de débats et d'enseignement.

Il s'agit de trouver un « langage », des concepts et méthodes communs, ou tout au moins des formes de compréhension et d'acceptation, de favoriser les programmes, plateformes, zone atelier, groupements ou fédérations de recherche... qui initient et structurent les échanges interdisciplinaires. Il s'agit également de leur donner le temps.

## Évaluation dans un cadre interdisciplinaire

L'interdisciplinarité ne peut se baser sur une recherche individuelle et demande du temps. Cela pose alors le problème de l'évaluation, problème d'autant plus accru que la politique managériale du CNRS est de récompenser l'individu. Le recrutement d'un chargé de recherche ou d'un directeur de recherche par la CID 45 se fonde bien sûr sur la qualité scientifique du candidat et de son projet. Toutefois, ce sont des conditions nécessaires mais non suffisantes. Le projet devra en outre être clairement interdisciplinaire. Les candidats CR1 et DR2 devront également montrer qu'ils ont déjà une expérience de cette interdisciplinarité. Si cette expérience ne saurait cependant être exigée pour les candidats CR2, il faut alors que ceux-ci y tendent, à travers des hypothèses de travail, des questions, voire des premiers résultats.

L'interdisciplinarité s'évalue d'une façon particulière dans la mesure où elle peut se manifester de différentes manières :

– en amont par la démarche d'insertion dans une équipe d'une autre discipline, par l'application de méthodes spécifiques à une discipline à des champs de recherche relevant d'une autre discipline ; la simple collaboration entre chercheurs de diverses disciplines ne suffit généralement pas pour dépasser la simple pluridisciplinarité ;

– en aval par des publications communes dans des journaux interdisciplinaires ou publications parallèles illustrant différentes avancées du travail dans chacune des revues appropriées ; la publication en premier auteur d'un travail dans un journal d'une autre discipline est un signe de réussite de cette interdisciplinarité ; la transdisciplinarité, c'est-à-dire le changement de discipline du candidat, est évidemment un atout majeur quand ce dernier aborde un nouvel objet avec le regard de son ancienne discipline.

## ANNEXE 1 : DÉFINITIONS DES SIGLES ET ACRONYMES

OSU	Observatoire des sciences de l'univers (INSU)	OHM	Observatoire Homme-Milieu (INEE); observatoire interdisciplinaire autour d'une rupture socio-économique; il en existe actuellement une demi-douzaine en France, Amérique du nord et du Sud, Afrique.
ORE	Observatoire de Recherche en environnement (ministère de la recherche), depuis 2001; il en existe une trentaine.	ANR	Agence nationale de la recherche, finance la recherche sur projets
SOERE	Systèmes d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement, depuis 2009 (ministère de la recherche)	BAP	Branche d'Activités Professionnelles, regroupe les métiers liés à la recherche (ingénieur, techniciens, administratifs) en 8 grands domaines de compétences.
ZA	zone atelier, c'est un dispositif de recherche interdisciplinaire de dimension régionale (INEE); il en existe actuellement 8; ils appartiennent au réseau européen:	SES	socio-écosystèmes, écosystèmes issus de l'interaction entre processus naturels et anthropiques.
LTER-Europe	Long-term ecological research	DCE	directive cadre européenne sur l'eau

---

### Note

(1) D'après Di Castri: *Godard O., la relation interdisciplinaire: problèmes et stratégies*, pp. 427-456.



RAPPORT DE PROSPECTIVE

---

DES HUIT CONSEILS SCIENTIFIQUES DE DÉPARTEMENT



# CSD

## ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

*Président*

Jean-Christophe AUFFRAY

*Rapport non transmis par le CSD Environnement et développement durable.*

*Membres de la section*

Jean-Pierre AMIGUES

Robert BARBAULT

Marc BERGDOLL

Hervé BOHBOT

Wolfgang CRAMER

Bruno DAVID

Geneviève DEFAGO

Jean-Jacques DELANNOY

Sylvie DERENNE

Olivier DONARD

Josette GARNIER

Claude GILBERT

Lamine GUEYE

Joël GUIOT

Françoise HENNION

Yvon LE MAHO

Sandrine MALJEAN-DUBOIS

Véronique MARTIN-JEZEQUEL

Pascal MARTY

Gilles MORVAN

Vanesa RICHARD

José-Miguel SANCHEZ-PEREZ

Claudine SCHMIDT-LAINE

Yolène THOMAS

Gérard THOUZEAU

Christiane WEBER



**CSD**

**MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE,  
PLANÈTE ET UNIVERS**

*Président*  
Rémy MOSSERI

*Rapport non transmis par le CSD Mathématiques, physique, planète et univers.*

*Membres de la section*

Angel ALASTUEY  
Eric BUFFENOIR  
Monique COMBESCURE  
Cyril DRAG  
Jean-Yves DUBOZ  
Karine DUMESNIL  
Jean-Pierre GASPARD  
Bertrand GIRARD  
Denis GRATIAS  
Didier GUYOMARC'H  
Raphaële HERBIN  
Mathieu KOCIAK  
Claudine LACROIX  
Annick LOISEAU  
Robert S. MACKAY  
Dominique MAILLY  
Antoine MATTEI  
Alexandre MATZKIN  
André NEVEU  
Xavier OBRADORS  
Éric PEREZ  
Joël PLANTARD  
Anne RENAULT  
Jean-François ROCH  
Jean-Luc SAUVAGEOT  
Vladimir TIKHONCHUK  
Stefaan VAES  
Fabrice VALLÉE



**CSD**

# **PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET PHYSIQUE DES PARTICULES**

*Président*

Jacques DUMARCHEZ

*Rapport non transmis par le CSD Physique nucléaire et physique des particules.*

*Membres de la section*

Anne LEFÈVRE-SCHUHL

Luc PERROT

Marie-France RIVET

Daniel SANTOS

Ursula BASSLER

Bertram BLANK

David BRASSE

Gérard CLAVERIE

Sylvain DAVID

Jean-Pierre DELAHAYE

David D'ENTERRIA

Lucia DI CIACCIO

Umberto DOSSELLI

Jens Jorgen GAARDHOJE

Philippe GHEZ

Jérôme GIOVINAZZO

Denis JOUAN

Frédéric KAPUSTA

Michel LION

Frédérique MARION

Philippe MORETTO

Christophe PRÉVOST

Michael PUNCH

Christelle ROY

Charling TAO

Marc WINTER



# CSD

## PLANÈTE ET UNIVERS

*Présidente*

Catherine JEANDEL

*Membres de la section*

Luc ANDRÉ

Sandrine ANQUETIN

Émile-Michel ARMENGAUD

Antje BOETIUS

Ary BRUAND

Hélène BUDZINSKI

Pierre CARTIGNY

Nadine CHAUMERLIAC

Philippe DAVY

Martine DE ANGELIS

Michel DE SAINT BLANQUAT

Frank DEHAIRS

Étienne DELOULE

Pierre DROSSART

Martin GIARD

François GUILLOCHEAU

Jean-Marie HAMEURY

Liliane JENATTON

Yann KLINGER

Michel MARCELIN

Gabriel MARQUETTE

Bernard MERCIER DE LEPINAY

Christophe MONNIN

Rémy PICHON

Olivier RAGUENEAU

Gilles REVERDIN

Laurence REZEAU

Étienne RUELLAN

Chantal STEHLE

Pierre VALIRON

Michel VAUCLIN

### 1 – LE DÉPARTEMENT PU

#### 1.1 LA DIMENSION RECHERCHE : POSITIONNEMENT ET SPÉCIFICITÉS DE PU

Les grandes questions abordées aujourd'hui au sein des Sciences de l'Univers ont trait à la question des origines (de l'Univers, des systèmes solaires, des planètes, de la vie) en astronomie et en sciences de la Terre, au fonctionnement des enveloppes superficielles (celles qui supportent la vie) et en particulier à la réduction des incertitudes qui affectent les modèles climatiques pour les sciences de la surface (continent – océan – atmosphère) et aux couplages interne – externe et à la mesure du temps en sciences de la Terre. En raison de la taille et de la complexité des objets étudiés, ces questions demandent à la fois des coordinations internationales et des études fines, fédérant les compétences de plusieurs disciplines. Le CSD Planète Univers («PU») pose délibérément sa prospective à moyen terme autour de la question de l'interdisciplinarité, laquelle nous semble mériter plus de considération et de vrais outils au sein du CNRS que ce dont elle dispose aujourd'hui, que ce soit pour traiter des questions aux confins de la physique et de la matière ou en sciences de l'environnement. Ce choix s'appuie sur une autre spécificité des SDU qui organisent régulièrement des prospectives par champ disciplinaire, lesquelles prospectives (très «bottom up») aident la direction à orienter ses choix stratégiques sur

des échelles de 4 à 5 ans. Il est essentiel de rappeler que l'interdisciplinarité n'est pertinente que lorsqu'elle s'appuie sur des « noyaux disciplinaires » de haut niveau, et qu'elle est donc complémentaire d'un soutien à bon niveau de ceux-ci.

Les Sciences de la Planète et de l'Univers (SPU) ne sont pas organisées autour de disciplines au sens de la classification d'Auguste Comte, mais autour d'objets naturels et de milieux. L'étude de ces objets complexes nécessite de faire converger des savoirs et des savoir-faire issus de différentes disciplines (*i.e.* physique, chimie, biologie, mathématique, informatique). Les SPU sont donc naturellement pluridisciplinaires. Les deux exemples traités en encadré illustrent la nécessité et l'importance de cette interdisciplinarité pour progresser dans la connaissance d'objets ou de mécanismes fondamentaux. Les conditions souvent extrêmes qu'offrent les objets

(*i.e.* de la Terre profonde aux extrémités de l'Univers, en passant par les fonds océaniques et l'anthroposphère) garantissent à ces disciplines des domaines dans lesquels peuvent être testés et validés des concepts et processus les plus variés allant des fondements de la physique (en astrophysique) aux processus physiques émergents de la complexité, y compris les origines de la vie. En retour, une meilleure compréhension des objets et milieux naturellement complexes, de leur fonctionnement et de leur évolution nécessite bien souvent le développement de concepts et d'outils nouveaux, ainsi que de méthodes innovantes susceptibles de contribuer à faire évoluer les sciences connexes. Par exemple, nombre de théories modernes sur le chaos et la complexité ont pris corps pour expliquer la dynamique de phénomènes naturels comme les séismes, les cyclones ou les mouvements astronomiques.

### **Premier exemple de nécessaire interdisciplinarité : l'étude de la substitution cationique dans les squelettes des organismes vivants calcificateurs**

Une partie de la compréhension de l'évolution du climat de la Terre se base sur les données paléo-environnementales obtenues à partir de la variation de composition chimique des organismes vivants qui fabriquent leur squelette avec des carbonates de calcium. Ainsi la calibration des rapports Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca dans les coraux ou les foraminifères en fonction de la température permet de remonter aux conditions de température dans lesquelles ces organismes marins se sont développés. De nombreuses spécialités doivent être mobilisées de concert pour étudier ce problème. On peut citer : l'observation minéralogique et la mesure géochimique : le développement de sondes (ICP-MS couplée à l'ablation laser, nano-SIMS, TEM-SDX, etc.) capables de doser les éléments en trace et les rapports isotopiques à des échelles spatiales de plus en plus fines fait apparaître une variabilité des rapports Cation/Ca dans les carbonates qui remet en question les valeurs moyennes obtenues sur des échantillons de grande taille. Ces observations mettent aussi en évidence la structure complexe (imbrication minéral/matière organique) de ces matériaux.

L'équilibre chimique et la croissance cristalline : les systèmes Solution Aqueuse-Solution Solide (SSAS) imposent de dépasser la vision simplificatrice du modèle du minéral pur et de là développer une formulation adéquate des conditions de stabilité des phases minérales substituées. Le calcul de la sursaturation conduit à l'énergétique des réactions biogéochimiques et l'élucidation des mécanismes réactionnels (zonation de composition, réactions chimiques oscillantes). Le développement de techniques telles que la microscopie à force atomique (AFM) permet de voir en direct la construction des phases minérales à l'échelle atomique. les variations de la composition de l'eau de mer : le rapport Mg/Ca de l'eau de mer a varié au cours des temps géologiques, avec des conséquences majeures sur la stabilité des

carbonates dans l'environnement marin. Ceci exige de développer le calcul des propriétés thermodynamiques de l'eau de mer en fonction de la composition et non pas seulement de la salinité, ce qui permettra en outre l'interprétation de la composition des eaux interstitielles des sédiments marins (bases de données DSDP/ODP/IODP). Rappelons enfin que la construction du diagramme de phase  $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-(Fe,Mn)CO}_3\text{-H}_2\text{O}$  est un problème majeur de la sédimentologie (et aussi vieux qu'elle). Les effets vitaux : on désigne sous ce terme « 1) les processus biologiques liés à la croissance des squelettes qui brouillent le simple enregistrement dû à la croissance cristalline, 2) une désignation générique qui cache le fait qu'on ne les comprend pas » (W. Broecker). Ainsi il apparaît que les organismes vivants sont capables de construire leur squelette par un processus qui semble défavorable d'un point de vue énergétique global entre l'eau de mer et le minéral. Deux questions fondamentales se posent. Quel avantage ces organismes tirent-ils de ce processus, sachant que les lois de l'évolution ont tendance à faire disparaître les organismes peu adaptés ? Quels avantages ont-ils pu en tirer lors de leur apparition sur la Terre, sachant qu'ils ont trouvé un moyen de survivre, à l'échelle des temps géologiques, à des changements de conditions environnementales qui leur sont devenues défavorables ?

On voit donc que l'étude de la substitution cationique dans les squelettes carbonatés des organismes vivants est un exemple d'interdisciplinarité entre les sciences du vivant, la chimie (physique, minérale, analytique), la géologie, l'océanographie, etc., avec des implications importantes sur l'histoire climatique de la planète, au cœur des préoccupations scientifiques de l'INSU.

## **Second exemple de nécessaire interdisciplinarité : l'étude des exoplanètes**

Les exoplanètes suscitent auprès des scientifiques comme du public un fort engouement. Elles permettent de replacer les questions

de l'origine du système solaire et de l'origine de la vie sur Terre dans un plus vaste contexte. Depuis la première découverte en 1995 à l'Observatoire de Haute Provence, près de 500 planètes extrasolaires ont été détectées par différentes méthodes : perturbations des vitesses radiales, transits, ou imagerie directe, microlentilles, etc. Ces détectations apportent des résultats étonnants comme l'existence de planètes très massives (plus de dix fois la masse de Jupiter), le grand nombre de planètes très proches de leur étoile, ou encore l'existence d'exoplanètes dans des conditions extrêmes (restes de supernovae). Les systèmes comprenant plusieurs planètes ne sont pas rares. La précision accrue permet désormais de détecter des « super-Terre », planètes plus massives que la Terre mais supposées rocheuses.

D'une façon générale, les planètes extrasolaires se caractérisent par une extrême diversité dans leurs propriétés (orbites, masses, composition) et leurs conditions de formation.. Cette diversité dépasse de loin celle de notre système solaire qui pourtant est déjà très riche. Étudiées par divers satellites dont COROT, et des instruments sur des télescopes au sol comme HARPS et NACO à l'ESO, SOPHIE à l'OHP, elles sont détectées principalement dans le domaine optique et essentiellement de manière indirecte. Cependant, la méthode de spectroscopie de transits des planètes a permis l'obtention des premiers spectres planétaires, et d'une étude physique de leur composition (détectations de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) ; une grande variété est là aussi observée.

L'étude des exoplanètes inclut aussi celle de leur environnement, en particulier les propriétés de l'étoile hôte du système. Récemment un cycle d'activité magnétique analogue à celui du soleil a été découvert. L'étude des exoplanètes fait appel à des domaines très variés des différentes disciplines de l'INSU, au-delà du périmètre de l'astrophysique, et des autres Instituts, qui nourrissent le programme Interdisciplinaire Environnements planétaires et Origines de la Vie (EPOV). La diversité des thèmes abordés et la nécessité d'une approche interdisciplinaire sont aussi source de réflexion pour la recherche en

épistémologie. Parmi les thèmes abordés : Caractérisation des exoplanètes. Rôle de l'environnement astrophysique (étoile hôte, autres planètes) sur les propriétés des planètes. Origines des matériaux organiques primitifs du système solaire et plus généralement des systèmes planétaires. Processus d'altération et d'évolution de ces matériaux par les rayonnements et les chocs. Extractions, identifications, caractérisation de l'origine de la matière organique. Études des processus atmosphériques et géologiques qui conditionnent les environnements planétaires primitifs (sur la Terre ou sur d'autres planètes). Recherches géo-microbiologiques permettant d'approfondir les connaissances des premières niches écologiques et des premiers micro-organismes. Études de formes de vie et de systèmes moléculaires en conditions extrêmes. Exploration des facteurs physiques (température, pression, sels, rayonnements, etc.) susceptibles d'intervenir dans le développement de la vie au niveau moléculaire et/ou cellulaire. Synthèses chimiques des briques élémentaires du vivant, complexification, apparition de l'homochiralité. Processus biochimiques précoces de collecte de l'énergie et de formation de matière organique. Modèles plausibles de systèmes métaboliques. Approches expérimentales et théoriques de la biologie systémique en rapport avec le développement de la biologie synthétique. Approches informatiques et bioinformatiques en rapport avec les travaux de « vie artificielle ».

Les Sciences de la Planète et de l'Univers sont des Sciences de l'Observation qui nécessitent la mise en œuvre d'une activité métrologique de type R&D qui pousse les technologies à leurs limites et pour laquelle le développement et la réalisation des instruments s'étalent bien souvent sur plusieurs années. Cette activité

essentielle mobilise des équipes diversifiées de spécialistes de différents métiers, induit des liens importants – et souvent peu formalisés – avec des industries petites et grandes proches des laboratoires et implique, de façon structurelle et fondamentale, le maintien d'un corps technique important.

Les Sciences de la Planète et d'Univers sont basées sur des données dont l'acquisition est

assurée soit par des très grands et grands équipements dont la pérennité doit être assurée (télescopes, avions, bateaux, réseaux de stations de mesure au sol, etc.), soit par d'autres voies (*i.e.* missions spatiales, campagnes coopératives, mésocosmes et microcosmes de laboratoire et/ou de terrain, imagerie haute résolution des milieux, outils analytiques, etc.) et dont l'importance n'est pas moindre. De ce fait, la communauté des Sciences de la Planète et de l'Univers est amenée à gérer (et le sera de plus en plus) de très grandes quantités de flux et de stocks de données multiples et diverses impliquant la construction de Bases de Données et de Systèmes d'Informations (ainsi que leur maintien et leur enrichissement) dont la maîtrise et l'utilisation constituent des « Observatoires Virtuels » nécessitant des personnels spécifiquement dédiés.

La programmation et la mise en œuvre des très grands équipements, la coordination de moyens d'observation multiples la plupart coûteux en ressources humaines, la taille et la complexité des objets d'étude, rendent impérative la définition d'une stratégie nationale et internationale, avec des exercices réguliers de prospective où la communauté scientifique définit les objectifs et identifie et met en priorité les moyens nécessaires. Ces perspectives s'interfacent de plus en plus avec des perspectives plus globales, par exemple la prospective européenne de l'astronomie menée par le programme européen Astronet en 2007-2008, ou celle des Alliances récemment constituées comme ENCRE ou AllENVI. L'autre impact est la structuration nécessaire des Sciences de la Planète et de l'Univers, qui depuis longtemps se fédèrent autour de programmes nationaux et internationaux, dont les objectifs émanent de réflexions des communautés scientifiques.

L'articulation de la stratégie et de la structuration définies au niveau national et international avec le nouveau paysage de la recherche française (LRU, ANR...) est un défi capital pour l'avenir de ces sciences. Le système de recherche doit aussi être aménagé pour prendre en compte la longue durée de nombreux projets d'observation et du déploiement des services associés.

La nécessaire pérennité des Services d'Observation et des Systèmes d'Information, le développement d'actions en R&D, la mutualisation d'activités scientifiques et techniques et des moyens y afférant justifient une politique volontariste de structuration des laboratoires en Observatoires des Sciences de l'Univers pour faire face à toutes leurs responsabilités.

L'immense spectre, tant spatial que temporel, des systèmes étudiés (de l'angström au gigaparsec, de la fraction de seconde à plusieurs milliards d'années), leur sous-détermination, la présence de multiples interactions et rétroactions entre processus et compartiments du système terre ainsi que le caractère hautement non linéaire de leurs comportements engendrent la complexité. En outre, ces systèmes sont en perpétuelle évolution, de façon naturelle comme la tectonique des plaques ou la météorologie ou anthropique comme le réchauffement actuel du climat. Leur modélisation exige des outils de simulation numérique dont la complexité (et la fiabilité) est (et sera) justifiée par le besoin de disposer d'outils opérationnels pour prévoir et anticiper les aléas, voire gérer les risques et crises. Cela nécessite de maintenir des capacités de calcul adaptées au plan national ainsi que l'adaptation des centres de calcul aux besoins spécifiques de la simulation.

Enfin, la spécificité des métiers et thèmes de recherches en Sciences de la Planète et de l'Univers requiert des formations spécifiques à l'approche des domaines SDU, qui nécessitent l'intégration de solides connaissances de base dans un cadre complexe et pluridisciplinaire. La création d'un vivier de jeunes chercheurs et personnels compétents au plus haut niveau pour faire progresser nos connaissances en Sciences de la Planète et de l'Univers doit être reconnue comme primordiale dans le dialogue entre CNRS et universités.

## 1.2 LA DIMENSION SOCIÉTALE, CULTURELLE

Les recherches en sciences de l'univers nourrissent abondamment la culture et la

curiosité scientifiques de nos concitoyens. L'évolution des contenus des manuels scolaires ou des ouvrages de vulgarisation en astronomie, géologie, planétologie ou océanographie au cours des 30 dernières années et leur succès montrent bien l'impact culturel et social des connaissances acquises par la communauté SPU. Les différents domaines traités par le département attirent les jeunes, soucieux de comprendre l'univers et son avenir. Le questionnement sur les origines et la place de l'homme sur Terre, ainsi que sur son devenir, comporte une dimension philosophique qui a de tout temps profondément influé sur la structuration de la pensée humaine. À une époque de désaffection pour les sciences et la technologie en général, il est important de profiter de cet atout des SPU pour contribuer à (re) développer le goût des sciences pour les générations futures de chercheurs.

La taille et la complexité des objets étudiés font que les fonctionnements de la planète terre et de l'univers lointain sont encore mal connus. Or, leur rôle fondamental dans l'apparition de la vie, la distribution des ressources et des besoins fondamentaux de l'humanité (eau, nourriture, énergie, matières premières) donnent à l'étude de ces objets une importance primordiale en ce début de 3<sup>e</sup> millénaire, en regard à l'augmentation de la pression sociétale (croissance démographique, développement économique, urbanisation galopante), à l'impact sur les ressources naturelles non renouvelables et à la modification de l'équilibre climatique. Cette pression sociétale nécessite une mobilisation des talents et des ressources scientifiques pour pouvoir associer la satisfaction des besoins toujours croissants à un respect de l'environnement, et permettre un développement durable, clé de voûte de l'équilibre du monde de demain.

Parce qu'elle témoigne d'une capacité croissante à prévoir et évaluer l'impact des perturbations et crises (*i.e.*, crues, inondations, étiages et sécheresses, pollutions des eaux, des sols et de l'air, éruptions volcaniques, tremblements de terre, etc.), la communauté SPU est (et sera) également soumise à des demandes « sociétales » multiformes de plus en plus

prégnantes. Ces demandes donnent aux organismes de recherche en général, et au CNRS en particulier, une responsabilité particulière pour développer des éléments de connaissance fondamentale sur ces phénomènes, et pour acquérir un niveau d'expertise fiable sur les questions de société qui en découlent. Au-delà de la compréhension du monde qui nous entoure, il faut pouvoir l'analyser et prédire ses évolutions possibles, et avoir la capacité de l'expliquer avec des arguments fiables à un public sans l'acceptation duquel il n'est pas possible d'entreprendre les actions nécessaires pour préserver son avenir.

Dans ce contexte, la production de documents pédagogiques sur les méthodologies et l'état de nos connaissances sur des questions comme le climat, la « relation soleil-climat », la montée du niveau marin, les risques naturels ou l'épuisement des ressources est une nécessité incontournable. Au plan des laboratoires, cela exige de développer de l'expertise, de renforcer les partenariats avec les agences à vocation plus opérationnelle, les décideurs politiques et les acteurs industriels ainsi que de mener une communication de qualité.

### 1.3 LA DIMENSION ÉCONOMIQUE

Les milieux étudiés par SPU sont du domaine du public et touchent à l'environnement direct de l'humanité, qui n'a pas de marché économique au sens étymologique du terme. Mais le besoin croissant en énergie et matières premières et son impact sur l'environnement ont une dimension « économique » incontournable. L'histoire récente montre que la communauté scientifique ne peut répondre aux questions de la société et participer au progrès économique que parce que ces réponses se fondent sur les avancées de la connaissance, que seule autorise une recherche fondamentale soutenue et dont le rythme est respecté. Par exemple, l'effort de recherche dans le domaine de la métallurgie ne doit pas être conditionné au prix des métaux : ce fut le cas depuis une vingtaine d'années avec

pour conséquence une perte collective de compétence. La remontée des cours et la perspective de l'épuisement des réserves connues ont relancé les programmes d'exploration du sous-sol, induisant une demande significative de cette compétence perdue. Cet exemple souligne la responsabilité des organismes de recherche dans le maintien de ces compétences de fond.

En ce qui concerne le changement global et le développement durable, trois thèmes cruciaux pour le devenir de la planète permettent d'illustrer des orientations que le département pourrait prendre pour conjuguer les aspects Recherche/Société/Industrie : les Gaz à Effet de Serre (GES), la gestion de l'eau, et les ressources naturelles minérales et énergétiques.

1/ Le déploiement de solutions intégrées pour la réduction des GES et la protection de l'environnement représente un enjeu majeur aussi bien pour les industriels que pour les gouvernements. Une activité de recherche sérieuse doit donc être menée parallèlement sur la modélisation des impacts de l'activité humaine et sur les comportements sociétaux des diverses communautés cherchant à se développer. Du côté de l'industrie, réduire l'impact écologique de cette croissance nécessitera un très gros effort en R&D, pour lequel un rapprochement industrie-monde académique doit être d'autant plus encouragé que, comme le rapport Stern le souligne, l'ensemble de la société y trouverait son compte, ou comment transformer ce risque en opportunité.

2/ De façon similaire, des efforts d'investissement tant en recherche que du point de vue industriel sont nécessaires pour faire face à la contrainte sur la ressource en eau, (quantité, qualité et coût), tant dans les processus de traitement que sur les conséquences des événements hydroclimatiques extrêmes (sécheresse, inondations, vagues de chaleur, tempêtes). Une vision stratégique à 2030 a été élaborée par les différents acteurs et les solutions technologiques innovantes à mettre en œuvre couvrent également un vaste champ allant des sciences de la nature, de l'ingénierie de haute technologie, de la gouvernance, aux sciences sociales, économiques, légales et politiques. Là

encore, la conjugaison des efforts industrie-monde académique permettra de mettre cette vision en action.

3/ À long terme, il est clair que notre dépendance à une énergie fossile et à des ressources minérales limitées n'est pas tenable, tant écologiquement qu'économiquement. Un exemple en est l'envolée récente des prix du pétrole qui a attiré l'attention sur les risques de notre dépendance au plan de la sécurité énergétique. La prise de conscience du fait que le monde commence à épuiser ses réserves (de carburant bon marché, d'uranium, de métaux stratégiques...) nous oblige à travailler sur une mutation vers des technologies plus sûres et plus propres. Les ressources naturelles minérales et énergétiques nécessitent, pour leur développement, des liens étroits avec les partenaires industriels (ex : Total, GDFSuez, AREVA, Eramety, Eurogia, Schlumberger) mais aussi avec les autres EPST (IRD), les EPIC (BRGM, IFREMER, ANDRA, IFP, CEA). Un effort important de structuration est en cours et doit être soutenu afin d'étoffer et pérenniser ces liens, mais également d'améliorer la lisibilité de la communauté académique concernée pour que ces partenaires puissent établir des collaborations de recherche bilatérales ou coordonner des actions plus structurées (Actions INSU, programmes, consortiums, appels d'offre ANR) sur ces thèmes. Les questions de recherche concernent principalement les systèmes pétroliers, la dynamique des réservoirs, l'aval des cycles énergétiques et industriels (stockages profonds et CO<sub>2</sub>, recyclage), l'hydrogène naturel, les modèles métallogéniques, l'exploration (gisements cachés), et la géothermie.

Les relations entre les sciences de l'univers et l'industrie spatiale sont essentielles. Grâce au CNES, la France a gardé en Europe son leadership historique et est le premier actionnaire d'Ariane Espace. Les laboratoires spatiaux ont, via les master et les écoles doctorales, un rôle important dans la formation des ingénieurs du domaine. Le développement d'expériences spatiales a un effet structurant pour PU, en raison des temps importants de développement des projets et de l'ouverture

qu'ils permettent vers de nouveaux domaines scientifiques encore inexplorés. Les expériences d'accompagnement au sol ou les théories développées pour préparer ou interpréter ces expériences contribuent directement ou indirectement à l'essor de ce secteur. Les produits développés dans les laboratoires grâce à l'exploitation de données d'observation de la terre représentent une niche importante – mais pas encore suffisamment valorisée – pour renforcer les liens et transferts entre les laboratoires et les industries. Un effort conséquent devra être fait pour développer cet axe de valorisation. Les relations avec le milieu industriel sont bien évidemment à double sens : intéressés par la prise de contrats pour réaliser les missions spatiales scientifiques, les industriels entretiennent avec les laboratoires de nombreux partenariats (financements de doctorants, actions de R&D, consultance) qui sont de fait des opérations de transfert de technologie.

La connexion avec la société ne sera rendue effective que par une étroite collaboration entre les différents acteurs du monde économique : scientifique, industriel et social. Ceci doit passer par le renforcement du lien public-privé qui ne se réalisera que par le partenariat à long terme entre les différents acteurs de la chaîne de valeur scientifique. L'intérêt du renforcement des collaborations industrie – monde académique réside également dans la masse critique atteinte (agrégation scientifique et des ressources) qui permet la définition d'objectifs scientifiques plus ambitieux. Cette stratégie contribue directement à la mise en place des politiques européennes, et ce, dans l'objectif de Lisbonne des 3% du PIB européen consacrés à la recherche par l'attraction de plus de capitaux privés et par une meilleure focalisation des capitaux publics. En pratique un Euro public bien utilisé, via les programmations nationales ou Européennes, doit conduire à 2 Euros investis par le secteur privé, qui ne jouera le jeu que s'il mesure son retour sur investissement : brevets en commun avec les laboratoires, doctorants et PostDocs en laboratoire industriel ou académique ou mixte, chaires industrielles, implication dans la définition des contenus pédagogiques, etc. Les outils financiers sont là, trop souvent mal utilisés

pour engendrer l'intérêt et l'investissement industriel (en contrats ou en mise à disposition de données et de moyens très onéreux, voire inaccessibles pour les labos). Le tryptique scientifique (académie) – technologique (recherche finalisée) et industrie (accès au marché) doit se révéler gagnant pour chacun du fait de la complémentarité des différents acteurs, s'il est correctement mis en place (*i.e.* si chacun mesure dès sa mise en place le gain qui va en résulter)

## **2 – MÉTHODOLOGIE DES RECHERCHES EN PU : UNE APPROCHE COUPLÉE**

### **2.1 OBSERVATION**

L'observation est le socle commun à toutes les disciplines de PU. Elle peut avoir une dimension exploratoire (recueillir des informations aux frontières de la connaissance sur Terre et dans l'Univers), thématique (pour répondre à une question scientifique précise) ou encore temporelle (pour l'étude de l'évolution dynamique des systèmes naturels), et donc la nécessité d'observer sur le long terme. D'où l'importance de la mise en place de services d'observations, dotés de moyens dont la pérennité dans le temps doit être garantie (télescope, satellites, plateformes de mesure...). Les campagnes d'observation sont organisées pour répondre à une question scientifique et se déroulent sur ou à distance du « terrain ».

La très grande variété des objets étudiés et des questions posées, ainsi que la taille de certains objets (univers, océan...) nécessite d'établir des priorités, et de structurer la communauté autour d'objectifs. La structuration scientifique repose sur la mise en œuvre de programmes nationaux, qui souvent sont le relais de coordinations internationales. Toutefois la multiplicité et la diversité des milieux et

des dynamiques des objets naturels étudiés nécessitent de maintenir un équilibre entre grands et petits chantiers ; les grandes questions n'ont pas forcément besoin de grands chantiers. Ainsi par exemple la compréhension d'un objet naturel tel qu'une météorite ou une roche mantellique ramenée en surface par les volcans nécessitent de pouvoir replacer les observations physiques, chimiques, isotopiques dans des repères d'espaces et de temps, faisant appel à des techniques et méthodologies multiples.

Recommandation forte : Les programmes nationaux doivent être maintenus et refléter le fruit de réflexion collective des chercheurs, en harmonie avec leurs tutelles : en effet, seule la communauté scientifique est capable d'identifier l'état des connaissances à une période donnée et les moyens à développer pour progresser. Celle-ci doit donc être impliquée à tous les niveaux de la réflexion prospective et de l'orientation programmatique. Ce qui, dans le contexte actuel de la complexification du système de recherche, requiert de veiller à ce que la communication entre les différents niveaux de réflexion/décision soit fluide.

### **2.2 EXPÉRIMENTATION : LES DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX ET L'EXPÉRIMENTATION EN LABORATOIRE**

Les progrès de la connaissance sur les objets de PU reposent donc sur l'acquisition de données par l'observation à distance ou in situ, par des collectes de terrain, et en laboratoire pour l'analyse des échantillons collectés ou en support à l'interprétation des observations. L'analyse de ces données permet de découvrir de nouveaux objets et de nouveaux processus, de remettre en question des concepts que l'on croyait acquis, de valider des modèles, de proposer de nouvelles pistes. Les détecteurs, capteurs, dispositifs d'expérimentation en labo-

atoire, évoluent pour permettre la construction de nouveaux instruments et l'amélioration des performances des instruments existants.

Enrichies par les progrès de la physique, de la chimie ou de la biologie, l'activité de Recherche et Développement sur ces instruments de plus en plus sophistiqués est extrêmement importante pour l'étude des objets «PU». Elle requiert un potentiel technique performant et innovant afin de pousser les technologies à leurs limites, avec pour produit des données de plus en plus fines, parlantes et permettant de quantifier des processus.

L'expérimentation en laboratoire, quant à elle, permet à la fois 1) d'interpréter et de valider des observations faites sur le milieu naturel (par exemple en permettant d'étudier plus finement un processus) 2) à l'inverse, de détecter des processus «depuis la paille» qui peuvent ensuite donner lieu à des observations dans le milieu d'en vérifier l'impact.

Recommandation forte : maintenir des moyens d'expérimentation et de R&D au meilleur niveau pour que les laboratoires de PU restent compétitifs sur la scène internationale.

## **2.3 MODÉLISATION ET SIMULATION**

La compréhension des systèmes intégrés, macroscopiques et complexes nécessite de coupler observations et simulation numérique. L'intégration des nombreuses données collectées, les différences d'échelles spatiales et temporelles à intégrer pour modéliser ces systèmes complexes requièrent de nouveaux concepts mathématiques. Un des enjeux essentiels pour les années à venir est par exemple de réduire les incertitudes sur les modèles climatiques et de fonctionnement du système terre.

La plupart des systèmes naturels sont complexes et les processus sont non linéaires. Certains sont caractérisés par d'énorme flux de données, d'autres au contraire par très peu d'informations. Dans ce contexte, il est impor-

tant pour nos communautés de veiller aux développements de nouveaux outils mathématiques (probabilistes, assimilation, éléments finis...) Un des défis est par exemple de réussir la représentation 4D des milieux complexes avec des sauts d'échelles (spatiale et temporelle) de plusieurs ordres de grandeur, et l'étude des couplages entre les différentes échelles. Ou encore, le besoin d'outils statistiques performants (ondelettes, morphlettes...), schémas neuronaux pour l'analyse de données, pour les modèles inverses, pour le contrôle et la validation des modèles, pour la modélisation d'ensemble, est identifié.

Un autre enjeu aujourd'hui est de réussir le portage des logiciels d'une plateforme à une autre – par exemple pour tirer le meilleur parti des machines petaflopiques – enjeu très technique qui nécessite du personnel spécialisé.

Recommandation forte : Pour mener à bien ces objectifs, la fusion de compétences entre mathématiques appliquées et PU peut nécessiter la mise en place de GDR, d'outils structurants communs dont le développement devrait reposer sur les questions /objet à simuler. À ce titre, il y a effectivement un besoin important en chercheurs numériques spécialisés, et en ingénieurs – programmeurs compétents en algorithmique.

## **3 – DES OUTILS/MOYENS SPÉCIFIQUES**

### **3.1 TGE, PLATEFORMES NATIONALES ET INTERNATIONALES, DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX**

Les Très Grands Équipements et plateformes sont un support essentiel à la recherche. Les moyens spatiaux sont aussi utilisés en appui à tous les domaines de recherche soutenus par l'INSU.

Ce sont des moyens à construire, développer, entretenir pour faire avancer nos recherches. Rentrent dans cette catégorie :

- les navires
- les avions
- les télescopes
- les instruments spatiaux
- les spectromètres et sondes
- instrumentation géophysique

La qualité des données acquises requiert des compétences analytiques à la pointe et des laboratoires équipés au plus haut niveau. Les développements instrumentaux requièrent le support de bureaux d'étude et des contacts avec les autres départements du CNRS. L'ensemble repose sur des personnels qualifiés, au fait de l'évolution des techniques : les formations à ces métiers expérimentaux, exploratoires et spécialisés étant très longues, la pérennité des postes accompagnée d'une formation permanente idoine est une stratégie essentielle. En astronomie, les TGE sont pour la plupart réalisés et opérés par des sociétés (ou traités) internationales en collaboration avec d'autres pays : l'Espagne et l'Allemagne pour l'IRAM, le Canada et les États Unis pour le CFH, 14 nations européennes pour l'ESO. Le CNRS se trouve donc engagé à long terme dans la gestion de ces sociétés qui forment et emploient des personnels hautement qualifiés. Il est crucial que le CNRS respecte ses engagements nationaux et internationaux malgré les aléas dus à la réforme de l'état (RGPP et LOLF) ou aux restrictions budgétaires. Il en va de la crédibilité de notre nation, et de notre potentiel à pouvoir engager les collaborations futures. L'océanographie souffre terriblement aujourd'hui de la très faible programmation des navires d'envergure de la flotte, dont le très haut niveau d'équipement n'a pourtant rien à envier aux meilleures nations marines. Les principales causes de cette faible programmation sont budgétaires et organisationnelles : il est urgent de les résoudre, au risque de voir la communauté nationale prendre un retard majeur dans ce secteur de recherche par rapport aux autres pays, y compris émergents

(Inde et Chine construisent en ce moment des navires d'envergure exceptionnels).

Recommandation forte : Mener une politique dynamique sur les TGE/TGI et pôles d'instrumentation pour que la communauté nationale maintienne voire améliore sa reconnaissance internationale.

## 3.2 SERVICES D'OBSERVATION

Il est essentiel de comprendre les mécanismes fondamentaux des fonctionnements des systèmes naturels, et cela à toutes les échelles, afin de prévoir les évolutions possibles à différentes échéances. Les observations régulières sur de longues périodes sont donc un dispositif incontournable, à la fois pour la recherche fondamentale et en réponse à des engagements contractuels avec l'état, et la communauté des Sciences de la Planète et de l'Univers est investie d'une « mission de service » pour mener à bien ces observations systématiques des milieux naturels. Les séries de données à long terme (SLT) sur des paramètres ciblés permettent de mieux appréhender les systèmes complexes. Les systèmes étudiés sont pour la plupart planétaires, voire universels : la plupart des SLT nationales sont inscrites dans des dispositifs internationaux.

Les Services d'Observation sont labellisés par l'INSU, avec trois sections pour différentes sous-disciplines (Astronomie, Sciences de la Terre, Surface et Interface Continentales-Océan-Atmosphère), et leur liste est régulièrement remise à jour. Les services d'observation en astronomie sont définis pour l'essentiel par regroupements fonctionnels qui suivent le chemin d'acquisition et de distribution des données, de l'instrumentation aux centres de traitement et d'archivage, avec aussi des services spécifiques pour la métrologie de l'espace et du temps et pour la surveillance solaire et les relations et l'environnement Soleil-Terre. À l'occasion de leurs exercices de prospective respectifs, les autres disciplines ont récemment réorganisé en profondeur leurs services d'observation, en les coordonnant et en les

regroupant autour des objets (type de milieu ou objet scientifique) observés. Les Science de la Terre ont a choisi d'organiser ses services d'observation sur une base thématique. Le domaine Surface et Interface Continentales-Océan-Atmosphère, dont l'exercice de prospective est en cours, prévoit aussi des regroupements par fonctions et par thèmes.

Il faut noter que labellisation comme service implique que les données produites ou gérées par le service sont mises à la disposition de la communauté scientifique (éventuellement après une « période propriétaire » qui doit être définie pour chaque service).

Les personnels du corps des Astronomes et Physiciens (CNAP), personnels dont les missions, en symbiose avec la mission de l'INSU, combinent recherche, enseignement et tâches de service dans les services labellisés, sont l'une des forces qui permettent à aux Sciences de la Planète et de l'Univers de mener à bien ses tâches d'observation systématique des milieux naturels : leurs compétences scientifiques assurent la pertinence des services, et une part de leur évaluation repose sur leur apport aux services.

Recommandation forte : Maintien des postes CNAP. Des évaluations régulières et des appels d'offre permettent de décider d'arrêter une Série à Long Terme ou d'en mettre de nouvelles en œuvre. Si l'évaluation scientifique des services doit être faite de façon récurrente par des comités ad hoc, leur gestion dépasse le cadre des quadriennaux des laboratoires et des financements sur programme et doit impérativement être suivie par les OSU et les tutelles (pour l'attribution des postes et des moyens pluriannuels qui permettent d'assumer la maintenance et la jouvence). Ils sont l'un des éléments essentiels des discussions entre le CNRS/INSU et les Universités.

### **3.3 BASES DE DONNÉES ET MOYENS DE CALCUL**

Les bases de données sont à la fois des archives de notre connaissance et des outils

exploratoires. L'augmentation du volume et de la complexité du type de données, la nécessité de conserver ces données et de les mettre à disposition de la communauté et des autres acteurs (autres organismes, services publics, grand public), demande de développer des centres de gestion de bases de données. Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS), créé en 1972 par l'INAG en collaboration avec l'INSU, en a été un précurseur. On peut également mentionner les centres de données organisés par pôles thématiques et développés en partenariat avec le CNES (*i.e.* ICARE, ETHER, POSTEL)

Outre leur rôle de collecte de données sur la durée, de « mémoire environnementale », les centres de gestion de base de données doivent répondre également aux besoins de traitement de ces données qui dépend de leur mode d'obtention. En effet, chaque système d'acquisition pose des problèmes spécifiques, selon les paramètres considérés, l'hétérogénéité spatiale et/ou temporelle du milieu considéré, la détection des données erronées et le traitement des données manquantes. Les recherches en sciences de la Planète et Univers sont de plus en plus interdisciplinaires et visent à étudier les interactions et les couplages entre des milieux très diversifiés. Elles tendent donc à faire collaborer des domaines scientifiques différents et conduisent donc à des difficultés supplémentaires, liées à l'augmentation de la variété des systèmes d'acquisition mis en œuvre. Ces questions se retrouvent dans la plupart des disciplines, où elles sont traitées généralement au cas par cas par des techniques « ad hoc », mises au point souvent empiriquement en fonction des besoins, mais l'interdisciplinarité tend à les faire ressortir, voire à les exacerber, en raison de la multiplication des sources de données.

Ces différents aspects doivent inciter au développement de méthodes plus générales, voire génériques, pour traiter la complexité des sciences de la Planète et de l'Univers et pour mutualiser les approches au sein de la communauté nationale.

L'évolution des moyens analytiques et d'observation in situ et depuis l'espace ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul

disponible pour la modélisation conduisent à l'accroissement des flux de données. Il est donc indispensable de pouvoir traiter au mieux l'information produite et d'intensifier le développement et l'application de méthodes permettant leur analyse systématique.

Recommandation forte : La mise en place de ces centres de gestion des bases de données est donc stratégique pour l'ensemble de la communauté nationale des sciences de la Planète et de l'Univers. Elle nécessite une réelle prise de conscience des besoins matériels (moyens de calculs ; espace de stockage et d'archivage ; outils logiciels) et surtout humains où la professionnalisation du métier doit être au cœur de la démarche afin de rendre attractif et pérenne cet investissement.

## 4 – ÉLÉMENTS DE GESTION ET D'ORGANISATION

### 4.1 LES MÉTIERS

Les métiers spécifiques des personnels techniques (les formations étant souvent très longues, nécessité de maintenir un potentiel humain technique fort, permanent et qualifié dans nos labos).

La recherche c'est d'abord des femmes et des hommes, chercheurs et ITA. Il est essentiel ici d'intégrer la dimension de ressources humaines qui fait souvent défaut. Il faut convaincre les décideurs politiques, mais aussi le grand public, qu'une politique ambitieuse pour la recherche et l'innovation ne peut faire l'économie d'une action prolongée qui passe par un effort programmé, pluriannuel, qui puisse éliminer les effets d'accordéon néfastes mais coutumiers. La France a besoin que ses meilleurs étudiants se tournent vers les métiers de la connaissance, et doit donc leur proposer des carrières attractives. Il convient de trouver un juste milieu entre la circulation

des jeunes chercheurs après leur thèse et des situations de précarité prolongée.

Recommandation forte : En ce qui concerne le recrutement des chercheurs, il est essentiel de ne pas réduire le vivier par des fléchages et de consulter le CSI et le séminaire élargi avant tout coloriage.

La situation des ITA est préoccupante, avec des besoins importants dans certains secteurs, et l'urgence d'une revalorisation des carrières pour mettre en adéquation compétences professionnelles et grades effectifs. La période à venir, avec de nombreux départs à la retraite, incite à des effets de biseaux à l'embauche dans certains secteurs, faute de quoi nous payerions à terme des pertes de connaissance et de savoir-faire.

Il y a nécessité de faire évoluer le répertoire des emplois types et la référence des métiers dans lesquels sont distribués les IT (exemple : les personnels travaillant sur le traitement des données et les bases de données ne se retrouvent pas vraiment dans les grilles existantes et sont à la marge entre plusieurs BAP).

Dans les années à venir, de nouveaux métiers peuvent émerger, qui restent peut-être à inventer du fait de la demande sociétale... Par exemple, la science est mal défendue au quotidien ; les médias intéressés uniquement par le sensationnel ne savent pas parler de la recherche en général... Il n'existe pas de vraies revues de vulgarisation ou très peu ; les journalistes scientifiques sont-ils trop peu nombreux ? On peut rêver d'une chaîne de télévision uniquement dédiée à la Science, animée par des scientifiques... Pour cela, des postes spécifiques sont peut-être à créer.

Recommandation forte : La science au CNRS dépend de façon vitale d'un noyau d'ITA aux compétences spécifiques, et couvrant l'ensemble des métiers techniques fondamentaux. Le département « PU » et les unités qui en relèvent doivent réfléchir d'urgence aux métiers que l'on veut maintenant pérenniser, à la politique de recrutement qui doit être construite avec l'ensemble des partenaires (CNRS ou non, et notamment, mais pas que, l'Université), en particulier face à la croissance actuelle

du nombre de CDD (25% des effectifs actuellement), qui va mener très vite à une perte critique de professionnalisme. Cette évolution peut conduire à une perte récurrente de savoir-faire si les projets sur lesquels sont embauchés les CDD ne s'articulent pas entre eux ou avec un noyau dur permanent. La création d'une population précaire de plus en plus nombreuse peut conduire à ne pas toujours recruter les plus compétents, dans un souci compréhensible de stabilisation.

## 4.2 LA DYNAMIQUE INTERNE DE L'INSU ET LES PARTENARIATS

### Dynamique interne : le séminaire de direction élargi

En concertation avec la direction scientifique (DS), le CSD PU sortant a suggéré de mettre en oeuvre un « séminaire de direction élargi bi-annuel » qui permette de fluidifier dialogue et communication au sein de l'INSU. Celui-ci est composé de façon informelle des représentants de la DS, du président du CSD (CSI), des présidents des Commissions spécialisées, des sections du CNAP et du Comité National. Des représentants du ministère ou d'autres organismes peuvent y être invités.

Recommandation forte : maintenir cet outil, qui a donné satisfaction aux participants des deux premières réunions.

### Partenariats

Un autre élément important dans la stratégie est la nécessité de développer et/ou de maintenir pour nos recherches des partenariats forts (avec l'Europe, les autres organismes via Allenvi, le privé) : quels moyens (parfois problèmes de gestion lourde, de management) ? C'est aussi une de nos spécificités, besoins pour organiser de grandes campagnes coopératives, pour développer de nouveaux outils (travail en réseau tel que sur les avions EUFAR par exemple).

Recommandation forte : Pour gérer au mieux les partenariats, force est de constater que le paysage actuel est assez complexe, en raison de l'empilement des structures coordinatrices. Il semble essentiel que soit étendu le rôle de la cellule « INSU-ANR » qui se nourrissent des prospectives des CSD (CSI) et communautés (AA, OA, SIC, ST...), à une fonction de dialogue actif avec les alliances Allenvi et Encre afin que les recommandations faites aux différents niveaux de réflexion ne soient pas à 180°. De la même manière, l'AERES s'est imposé dans le paysage de l'évaluation. Le département et le CN devront veiller à ce qu'une bonne harmonie soit respectée entre les unités évaluées et les personnels recrutés (évalués aussi)...ce qui passe, là encore, par un effort de communication et de présence « croisées ». Il est essentiel que l'INSU (et le CNRS) s'investissent pour définir une méthodologie ad hoc pour évaluer les unités rattachées à plusieurs instituts du CNRS.

## 5 – LES INTERFACES ENTRE PU ET LES AUTRES DÉPARTEMENTS DU CNRS

Au-delà des deux exemples détaillés dans les encadrés ci-dessus, nous suggérons ici une liste (courte et non exhaustive) de questions scientifiques qui requièrent un effort conséquent d'interdisciplinarité. L'enracinement des Sciences de la l'Univers et de la Planète dans les disciplines de base requiert un interfaçage efficace entre les chercheurs des différents départements du CNRS (ou d'autres organismes) intéressés par la question ou l'objet étudiés. À ce jour, certains projets interdisciplinaires ont réussi comme par exemple les programmes ECLIPSE (SDU-SHS), ECCO (SDU-SDV-SC-SPD), ou encore l'étude des astroparticules ou de l'origine des planètes et de la vie.

Recommandation forte : En termes prospectifs, les questions suivantes soulignent 1) le

besoin de renforcer les liens entre PU et mathématiques appliquées, physique, chimie et sciences de l'ingénieur 2) l'urgence de développer une approche de l'étude des enveloppes de la vie (terre solide et surfaces – atmosphère – océan) en intégrant ses composantes physico-chimiques (domaine de l'INSU) et vivantes (domaine de l'INEE) de façon efficace, sans quoi des verrous scientifiques majeurs resteront non résolus.

## **5.1 VERS LA PHYSIQUE, LA CHIMIE ET LES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR...**

Le domaine de la physique fondamentale, de la métrologie de l'espace et du temps, et des systèmes de référence est en forte mutation, avec une convergence des communautés d'astronomie, physique et sciences de l'ingénieur pour de nouveaux projets dans l'espace et au laboratoire. Pour accompagner ce développement et faciliter la structuration de cette communauté en émergence, la création d'une structure INSU, l'Action Spécifique GRAM (GRAvitation, physique fondamentale, systèmes de référence, Métrologie du temps et de l'espace), ouverte à la participation des autres instituts concernés, a été recommandée par l'exercice de prospective AA et créée.

Le domaine des astroparticules et de la cosmologie apparaît comme une interface majeure, où les astrophysiciens travaillent conjointement avec les physiciens des particules et les théoriciens. Les progrès majeurs accomplis dans la détection des photons de haute énergie en particulier laisse entrevoir l'avènement d'un nouveau champ pour l'astronomie : le principal enjeu devient la mise en œuvre d'une astronomie multi-messagers. Si la communauté de cosmologie est structurée au sein du Programme National Cosmologie et Galaxies, le besoin d'une structuration analogue pour l'astrophysique des hautes énergies est patent. La transformation du GDR Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie (PCHE) en

Programme permettra d'atteindre cet objectif, en conservant la tutelle des instituts concernés (INSU, INP, IN2P3) et un conseil scientifique interdisciplinaire.

L'étude des processus physiques et chimiques est un autre domaine où des collaborations interdisciplinaires doivent encore se développer. Celles-ci exploitent la très grande diversité des phénomènes naturels. Elles concernent la physico-chimie atmosphérique et son impact sur le climat, l'érosion des surfaces continentales et les cycles d'éléments chimiques entre continent et océan. L'astrophysique de laboratoire est une discipline en émergence, qui vise à contribuer à la connaissance des milieux et objets astrophysiques par des études expérimentales et théoriques. L'étude des processus qui se déroulent dans la terre profonde, et se traduisent en surface par les éruptions volcaniques, les mouvements des plaques et les séismes associés, représentent aussi un champ commun important avec la physique des matériaux en milieu extrême et leur rhéologie, les mécanismes de rupture et les processus de diffusion. Ce sont des domaines d'interface avec la physique et la chimie, qui font appel à des installations dédiées et aux grands instruments (par exemple Synchrotron SOLEIL, lasers de puissance).

La réalisation des nouveaux instruments, depuis les étapes de recherche et développement amont, à celles de la conception puis de la construction et du traitement des signaux, permet de nouer des collaborations fructueuses dans les domaines des sciences de la terre, de l'océan, de l'astrophysique et des sciences de l'ingénieur et du traitement du signal. Quatre grandes orientations se dégagent pour les travaux en traitement du signal, situées dans la problématique générale des problèmes inverses : la déconvolution d'images, l'analyse temps – fréquence ou analyse spectrale, la reconnaissance des formes, et le traitement des données hyper-spectrales. Les activités d'instrumentation font émerger le besoin de faciliter l'accès aux plates-formes technologiques pour les laboratoires de SDU, et de participer à la coordination du développement de ces plates-formes.

## 5.2 VERS LA BIOLOGIE, LA PHYSIQUE ET LA CHIMIE...

L'étude de la Terre vivante nécessite par essence une approche hautement interdisciplinaire regroupant les savoirs et savoir-faire des géologues, des biologistes ainsi que des chimistes et des physiciens. Le couplage entre caractérisation des échantillons géologiques et paléontologiques par des techniques modernes d'imagerie, de géophysique ou de géochimie (notamment isotopique) et l'approche moléculaire des biologistes (séquençage, phylogénie) doit ainsi être renforcé. Les développements de fortes et indispensables interfaces avec les autres instituts du CNRS, notamment l'InEE, est indispensable pour la mise en place des futures actions.

## 5.3 POUR TRAITER LES QUESTIONS D'ENVIRONNEMENT AVEC RÉALISME ET EFFICACITÉ

Les pistes ci-dessous (encore une fois non exhaustives) affirment le besoin pour les communautés d'avoir la possibilité de travailler ensemble sans cloisonnement de structures en mêlant les compétences spécifiques de leur domaine de recherche. Un blocage important provient en effet de ce que les études menées sur les « enveloppes de la vie » de la planète, l'ont souvent été de manière disciplinaire ou en découplant les différents compartiments. Un objectif fondamental semble donc de réunir, sur un même site ou autour d'un objet commun, des compétences diverses permettant la pluridisciplinarité qu'impose la complexité des systèmes étudiés. Le couplage entre cycles hydrologiques, géochimiques et biologiques apparaît ainsi comme essentiel. Il est nécessaire d'intégrer la dynamique du vecteur de transfert des éléments et des contaminants, souvent considérés comme immobiles, pour modéliser leur devenir. Enfin, le passage des observations aux très petites échelles (nano ou

micro, moléculaire ou individus pour le vivant) vers des échelles intermédiaires (mm ou cm, populations ou communautés pour le vivant) ou plus vastes (bassins versants, écosystèmes, zones estuariennes et côtières) reste une question ouverte.

Le recrutement est un outil très efficace pour répondre à ces objectifs. Le CSD PU recommande 1) le maintien voire le développement de programmes de recherche communs entre INEE et INSU à l'instar de ECCO, mais qui pourrait être élargi 2) le double rattachement de la section 20 à l'INEE et l'INSU

Le climat : l'étude du climat fait intervenir toutes les sphères du système climatique à toutes les échelles de temps et d'espace : atmosphère, biosphère (végétation mais aussi organismes vivants de la cellule aux animaux), hydrosphère (océan, rivières, zones humides...), cryosphère (banquise, neige, calottes), lithosphère (hydro-géologie, volcanisme,...) et même astronomie (relation soleil-terre-climat). La place de l'homme est essentielle en tant qu'acteur du système mais aussi en tant que « victime » des changements à venir, ce qui donne un rôle très fort aux Sciences de l'Homme et de la Société (histoire, géographie, économie, sociologie...) dans les études sur le climat, son impact et la remédiation. Un groupe de travail a été mandaté par le président du CNRS pour mener à bien une réflexion collective sur la méthodologie des modèles climatiques et les verrous à lever. Ce groupe est constitué de personnes de plusieurs disciplines, et son travail est en cours. Nous suggérons que ses conclusions nourrissent la réflexion sur l'interdisciplinarité et les priorités de recherches à venir. Nous suggérons aussi que des réflexions plus ciblées soient organisées au sein de l'INSU comme celles portant sur le lien « glace-climat » ou encore les actions et rétro-actions « biosphère-climat ».

Événements extrêmes : si l'aléa climatique (précipitations intenses par exemple) est à l'origine de ces événements, les risques et leurs impacts sont liés directement à l'activité humaine. Toute politique sur la réduction des risques, la mitigation, l'adaptation et la mise en œuvre d'actions en cas d'événements extrêmes

font intervenir toute la chaîne de décision du scientifique (météorologue, atmosphéricien) au politique.

**Pollution :** l'étude de la pollution se rapproche dans un certain sens de celle des événements extrêmes. S'ajoute un lien fort avec le secteur médical pour déterminer l'impact sur la santé et la détermination des seuils de dangerosité. La ville est un domaine particulièrement sensible (forte concentration de populations) mais les zones agricoles ou océaniques (littoral et hauturier) sont aussi largement impactées. l'étude intégrée des systèmes côtiers ou continentaux nécessite d'incorporer une composante « vivant » et les thèmes de recherches en lien avec le changement global s'inscrivent de facto entre les SDU et les Sciences de la Vie. Cette double appartenance est particulièrement cruciale dans les OSU « stations marines ». Les problèmes posés par le littoral en est un exemple illustratif de même que toutes les questions posées par l'épuisement des ressources halieutiques.

**Contaminants :** le devenir des éléments et des contaminants est contrôlé par leurs interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants de la surface de la planète. Sous le terme de « contaminants » sont inclus les composés chimiques d'origine anthropique ou naturelle, les nanoparticules, mais également les agents biologiques, pathogènes ou produisant des toxines. La compréhension du devenir des éléments « nutritifs » doit également être considérée. Dans le contexte écodynamique, le devenir des éléments et des contaminants recouvre leur distribution aussi bien spatiale que temporelle (transport réactif) et les modifications de leur forme chimique et structurale (spéciation). Cette distribution conditionne leurs effets sur le vivant ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. S'ajoutent des effets retour du vivant sur les contaminants comme les processus d'oxydo-réduction, complexation, méthylation, dégradation...qui impactent leur spéciation. La compréhension de l'ensemble des mécanismes contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants est donc un enjeu

de la plus grande importance dans le contexte des services de type préservation, altération, évaluation des risques, remédiation...La compréhension de ces processus nécessite d'en appréhender les mécanismes à l'échelle la plus élémentaire. Ceci concerne aussi bien la chimie analytique, la physicochimie des interfaces, que la biogéochimie, et met en jeu un ensemble d'interactions avec et entre les systèmes biologiques. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous les niveaux d'organisation biologiques jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère. Une telle compréhension est nécessaire pour fonder la modélisation des systèmes complexes sur des bases mécanistes afin de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles.

**La main de l'homme :** le comportement humain est sans doute, et de très loin, le plus grand facteur d'incertitude dans le changement global. Par exemple, on prévoit d'ici 2025 une pénurie d'eau pour environ 2 milliards d'individus et une augmentation des besoins en eau de l'ordre de 20 %. Les solutions doivent s'appuyer sur une gestion intégrée de l'écosphère continentale tenant compte des ressources et des demandes et des interactions physiques, environnementales et sociétal à travers les différents flux associés d'eau, d'énergie et d'éléments chimiques. Cette gestion doit s'appuyer sur une compréhension des processus à différentes échelles spatiale et temporelle. La encore, les enjeux sont critiques autour du littoral, lieu où se focalisent de nombreux conflits d'usage d'activité souvent antagonistes (développement industrialo-portuaire, tourisme, agriculture, pêche et aquaculture). Les recherches sociales et économiques doivent contribuer à la compréhension des fonctionnements de ces écosystèmes fortement structurés par les activités humaines.

Dynamiser les interactions entre les chercheurs de PU confrontés à ces questions multiparamétriques avec fort facteur humain et les collègues des SHS nécessite la mise en place d'outils structurants tels que des réseaux (GDR par exemple), des écoles d'été (un exemple est celle de eau – climat – expertise qui a généré

des « chantiers »), des axes transverses au sein des OSU voire laboratoires communs, tout en veillant à ne pas isoler un spécialiste de sa communauté. Les programmes de recherche communs peuvent aussi être mis en œuvre, avec par exemple deux appels d'offre pour un seul CS.

Recommandation forte : Quelque soient les connexions considérées, ces questions scientifiques interdisciplinaires ne réussiront que si les différentes disciplines de départ en retirent des bénéfices mutuels. Il faut identifier des problèmes communs, établir une série de

questions à intérêt mutuel, co-construire. Il est essentiel aussi que chaque spécialiste mette en commun des compétences, mais reste en pointe dans son domaine : le cas contraire engendre un risque important lors des évaluations de carrière.

*Post scriptum* : Avec le développement du Crédit Impôt recherche, un mécénat scientifique est entrain de se développer, de façon assez anarchique : il y a urgence à contacter les responsables de ces opérations et à trouver le moyen de les utiliser dans la plus grande concertation scientifique.



# CSD

## SCIENCES DU VIVANT

### *Président*

Giuseppe BALDACCI

### *Membres de la section*

Mireille ANSALDI

Fabio BENFENATI

Mireille BESSON

Jean-Louis BIRRIEN

Daniel BRETHERS

Bruno CANARD

Marie-Louise CARIOU

Didier CHATENAY

Dominique CROIX

Vincenzo CRUNELLI

Barbara DEMENEIX

Michèle FERRER

Bernard HOFACK

Anne HOSMALIN

Anne HOUDUSSE

Geneviève INCHAUSPE

Catherine JESSUS

Peter MAGILL

Christian MARENDAZ

Hélène MONE

Marc MOREAU

Jean-François MOUSCADET

Françoise MUSCATELLI-BOSSY

Gérard PEHAU-ARNAUDET

Pere PUIGDOMENECH ROSELL

Philippe ROCH

Christophe TIFFOCHE

Ariane TOUSSAINT

Francis-André WOLLMAN

### **Analyse des sciences du vivant et de leurs perspectives d'évolution basées sur les rapports de conjoncture et de prospective des sections 21-28, 30 et de la commission interdisciplinaire 43 du comité national de la recherche scientifique.**

Intitulé des sections et de la CID 43, rattachées à ce Conseil Scientifique :

- |        |  |
|--------|--|
| 21     | Bases moléculaires et structurales des fonctions du vivant   |
| 22     | Organisation, expression et évolution des génomes  |
| 23     | Biologie cellulaire : organisation et fonctions de la cellule ; processus infectieux et relations hôte/pathogène |
| 24     | Interactions cellulaires   |
| 25     | Physiologie moléculaire et intégrative   |
| 26     | Développement, évolution, reproduction, cellules souches   |
| 27     | Comportement, cognition, cerveau   |
| 28     | Biologie végétale intégrative  |
| 30     | Thérapeutique, pharmacologie et bio-ingénierie   |
| CID 43 | Modélisation des systèmes biologiques, bioinformatique   |

L'état des lieux des recherches menées par les chercheurs rattachés aux différentes sections ainsi que leurs perspectives sont détaillés dans les rapports de conjoncture rédigés par les sections.

Le Conseil Scientifique du Département des Sciences du Vivant (INSB) du CNRS (dorénavant appelé CSD-INSB) n'entend pas résumer ces rapports, qui méritent d'être lus dans leur intégralité, mais entend s'en servir pour identifier les perspectives générales des recherches en biologie et formuler des recommandations qui devraient être utiles à la direction de l'INSB.

Le CSD-INSB a décidé au préalable de rédiger un document volontairement succinct dans l'espoir d'en faciliter la lecture et la diffusion.

## 1 – INTERDISCIPLINARITÉ

Les membres du CSD-INSB considèrent que l'actuelle organisation en sections permet au Comité National de la Recherche Scientifique (CoNRS) de gérer les chercheurs du CNRS selon des axes thématiques larges et en nombre raisonnable.

Les recouvrements thématiques existant entre les sections sont inévitables, participent de l'interdisciplinarité croissante des recherches en biologie et ne semblent pas gêner les travaux des sections. Le développement de l'interdisciplinarité pour les recherches en biologie fondamentale et appliquée est souligné par toutes les sections. Ce besoin de mise en commun de compétences thématiques diverses n'est pas limité aux différents aspects de la biologie mais s'étend aux mathématiques, à la physique, la chimie, la médecine et jusqu'aux sciences humaines et sociales. Les chercheurs savent bien faire appel aux compétences complémentaires aux leurs qui sont utiles à l'avancement de leurs travaux. Cependant, le financement des recherches interdisciplinaires et le suivi des carrières des chercheurs qui se trouvent aux interfaces doivent impérativement être mieux pris en compte pour favoriser l'intégration dans une même équipe de chercheurs d'origines diverses, pour assurer une proximité indispensable à l'avancement des recherches interdisciplinaires.

Finalement, il faudra éviter que la création d'instituts indépendants au sein du CNRS, et d'ITMO au sein de l'alliance Aviesan, provoque des enfermements disciplinaires nuisibles.

## 2 – BIOLOGIE INTÉGRATIVE ET BIOLOGIE DES SYSTÈMES

Les approches « réductionnistes » de la biologie ont permis d'identifier les molécules fondamentales des êtres vivants et dans de nombreux cas d'élucider leurs fonctions dans les mécanismes de nombreux processus biologiques. Même si nombre de questions restent à résoudre par ce type de méthodologies, de nombreux collègues sont d'ors et déjà attirés par des approches « globales » dans l'étude de l'un ou l'autre phénomène biologique, ce qui requiert le développement d'outils conceptuels et technologiques originaux. Depuis quelques années, il est devenu possible d'obtenir et d'analyser une quantité énorme de données, comme celles produites par le développement d'outils d'observation de plusieurs phénomènes en même temps. En effet, les technologies « omiques » nécessitent des instruments originaux et des méthodes d'analyse nouvelles, largement fondées sur les mathématiques appliquées et l'informatique. Les systèmes récents de séquençage de l'ADN à très haut débit génèrent une quantité de données qui demandent non seulement une infrastructure informatique appropriée pour leur stockage, mais aussi le travail de bioinformaticiens pour être correctement et rapidement organisées, évaluées et interprétées. À l'image de la biologie moléculaire dans les années 1980, le séquençage à haut débit devient un outil incontournable dans de très nombreux domaines de la biologie. L'infrastructure et le nombre de bioinformaticiens devront répondre à ce besoin et des questions se posent donc sur la manière la plus efficace d'organiser des « plates-formes » appropriées.

### 3 – SYSTÈMES MODÈLES

Le maintien des études de multiples systèmes modèles est indispensable pour déchiffrer la complexité du vivant. Cependant, on observe un essor considérable de recherches qui font appel aux souris et aux rats. Il devient donc indispensable pour le CNRS de formuler une politique nationale des animaleries avec un financement adéquat pour leur fonctionnement, dans le respect des normes européennes dans ce domaine sensible. Il est aussi nécessaire de définir une politique claire au sujet des plateaux de transgénèse, pour réduire les coûts tout en permettant aux chercheurs qui en ont besoin un accès raisonnable à ces techniques. Il est aussi opportun de généraliser les techniques de cryoconservation pour diminuer les charges financières de l'élevage et le nombre d'animaux. D'autre part, il est aussi nécessaire d'augmenter en France le nombre de plateformes d'analyse fonctionnelle permettant d'évaluer en même temps plusieurs phénotypes, en particulier de rongeurs modifiés génétiquement et/ou soumis à des traitements spécifiques.

### 4 – FINANCEMENT DE LA RECHERCHE

Le système de financement sur appel d'offres tel qu'il est pratiqué actuellement ne semble pas permettre une prise en compte efficace des projets interdisciplinaires et de ceux qui impliquent une forte prise de risque. La mise en place d'initiatives (par exemple les PEPS) qui fournissent un apport financier modeste après une évaluation rapide par les équipes de directions d'Instituts peut répondre à ce besoin. Cependant, le nombre de ces initiatives est faible par rapport au nombre de demandes et il faut donc que ces soutiens soient réservés à des projets vraiment novateurs. L'appel d'offres récent pour les labora-

toires d'excellence dans le cadre du grand emprunt suit la logique de financer des groupes d'équipes identifiées sur la base de la notation A+ de l'AERES. Ceci ne tient malheureusement pas compte des différences entre disciplines, de l'évolution des équipes et de celle des notations AERES au fil du temps. Par ailleurs, la diminution, qui ne semble pas vouloir s'arrêter, des crédits récurrents prive les directeurs d'unité de la possibilité de soutenir des bonnes équipes qui rencontrent une période difficile et de façon plus générale d'avoir une politique d'encouragements financiers fondée sur leur connaissance directe de la structure qu'ils ont en charge. Finalement, l'INSB devrait renforcer le financement d'initiatives qui facilitent la mise en place et le développement de collaborations internationales, très profitables sur le plan scientifique et très utiles pour la constitution de réseaux de laboratoires capables de répondre avec succès aux appels d'offres internationaux.

### 5 – RELATIONS AVEC L'UNIVERSITÉ

Dans de nombreux secteurs, le développement rapide des recherches implique des besoins nouveaux de formation. L'exemple de la bioinformatique est particulièrement frappant, mais ceci est aussi le cas pour la biologie des systèmes et la physiologie. D'autre part, nous manquons aussi de spécialistes en métagénomique et en épigénétique. Dans ses divers partenariats avec les Universités, l'INSB devrait se faire porteur des besoins générés par les progrès scientifiques et technologiques en biologie et stimuler la mise en place rapide de formations nouvelles qui offriraient aux étudiants des compétences originales et potentiellement utiles dans le marché du travail. Le partenariat avec les universités peut aussi être mis en place pour l'acquisition de nouveaux instruments, tels que les séquenceurs à haut débit ou des

cryo-microscopes électroniques dont le coût est considérable et qui peuvent être utilisés par une communauté large. Par contre, il convient d'avancer avec prudence dans le chemin de la délégation de gestion financière des UMR aux Universités afin d'être sûrs que les structures administratives efficaces indispensables à la recherche en biologie soient mises en place. Finalement, dans la plupart des cas, les UMR sont bien intégrées dans le paysage universitaire où elles se trouvent et contribuent fortement à la notoriété des universités et à la formation des étudiants et doctorants.

## **6 – RELATIONS AVEC L'INSERM ET AVEC LES ALLIANCES**

À plusieurs reprises le CSD-INSB a exprimé son attachement au maintien d'un fort secteur de biologie au sein du CNRS, comme par ailleurs l'ont exprimé, après avoir consulté leurs structures, la très grande majorité des directeurs des unités rattachées à l'INSB. Cependant, nous sommes favorables à une coordination souple avec l'INSERM lorsque ceci peut faciliter le travail des chercheurs. Dans la mesure où les alliances constituent des structures qui permettent et facilitent une telle coordination avec de nombreux acteurs de la recherche française en biologie elles peuvent avoir des conséquences positives. Par exemple, une initiative qui donne des résultats encourageants a été la mise en commun du programme Atip-Avenir entre CNRS et INSERM.

Cependant, l'analyse de la distribution thématique des publications démontre que les activités des chercheurs de l'INSB et de l'INSERM ne sont pas identiques, même s'il est naturel qu'elles puissent se superposer dans certains domaines. L'importance du maintien d'un secteur de recherche fort et dynamique en biologie au CNRS est illustrée par la

qualité des publications des laboratoires rattachés à l'INSB dans les plus importants journaux scientifiques internationaux et par les résultats obtenus en réponse aux appels d'offres nationaux et internationaux, en particulier ceux de l'ERC.

Les recherches fondamentales menées au CNRS permettent une grande visibilité à de nombreux secteurs de la biologie qui ne sont pas directement liés à la santé. À ce sujet, le CSD-INSB confirme qu'il attribue une grande importance au maintien au sein du CNRS de la biologie végétale et de la microbiologie dans tous ses aspects non médicaux, dont le rôle dans l'étude de la complexité du vivant est évident.

## **7 – RELATIONS AVEC L'INDUSTRIE**

Plusieurs secteurs de la biologie effectuent aujourd'hui des recherches dont les résultats peuvent constituer un objet d'intérêt pour les industriels. Les chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'INSB participent au dépôt d'un bon nombre de brevets : leur sensibilisation aux applications de la recherche semble acquise. Or, le paysage dans ce domaine s'est singulièrement compliqué par la multiplication de structures chargées de la valorisation de la recherche, en particulier au sein des universités, des PRES et des autres EPST et institutions de recherche. Il est souhaitable qu'un chercheur qui veut valoriser ses résultats soit accompagné de façon efficace et transparente dans toutes les démarches nécessaires, tout en continuant à assurer son travail de recherche. Compte tenu des changements dans l'organisation du CNRS, l'INSB devrait assumer clairement un rôle d'information et d'orientation des unités dans leurs démarches vis-à-vis des industriels. Finalement, de plus en plus, les plates-formes gérées par les unités de recherche sont utilisées par des sociétés privées qui contribuent à leur équilibre financier. Ceci

démontre l'intérêt économique général de structures initialement mises en place en support des activités de recherche des unités.

En conclusion, le CSD-INSB souligne que les rapports des sections insistent sur l'importance de la recherche en biologie au CNRS. Le CNRS permet la réalisation de recherches fondamentales de grande qualité qui sont justifiées

par le besoin de comprendre l'origine, l'évolution et les multiples interactions qui permettent le fonctionnement des êtres vivants. La recherche fondamentale a largement démontré son rôle essentiel pour les avancées technologiques utiles à l'humanité et reste l'atout majeur du développement futur de notre société, de plus en plus fondée sur la connaissance.



# CSD

## SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

### *Président*

Philippe RÉGNIER

### *Membres de la section*

Philippe AGHION

Annarita ANGELINI

Dominique BRIQUEL

Albane BURENS-CAROZZA

François BUTON

Yves CHEVRIER

Olivier COUTARD

Jacques CREMER

Randi DEGUILHEM

Françoise DOUAIRE-MARSAUDON

Sophie DUCHESNE

Martine FABRE

Ghislaine FILLIATREAU

Colette FONTANEL

Yves GINGRAS

Antonio GUERCI

Fekri HASSAN

Hélène HAWAD-CLAUDOT

Jean-Charles HOURCADE

Isabel HUB-FARIA

Odile LE BRUN

Jean-Pierre LE CROM

Jacques LOLIVE

Emmanuel NEGRIER

Elisabeth NEMETH

Jean-Luc NESPOULOUS

Laurent SCHNEIDER

Marie-Noëlle SICARD

Isabelle SIDERA

Isabelle THIREAU

Christian TOPALOV

Georges VIGARELLO

Jean-Denis VIGNE

Patrick WEIL

Serge WOLIKOW

*Rapport non transmis par le CSD Sciences  
humaines et sociales.*



**CSD**

**SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DE L'INFORMATION ET DE L'INGÉNIERIE**

*Président*  
Yvan SEGUI

*Rapport non transmis par le CSD Sciences  
et technologies de l'information et de l'ingé-  
nierie.*

*Membres de la section*

Hisham ABOU KANDIL  
Olivier ALLIX  
Claude AMRA  
Brigitte BACROIX  
Marise BAFLEUR  
Philippe BAPTISTE  
Philippe BLANC  
Dominique BOLIGNANO  
Thierry BRETHEAU  
Catherine BRU-CHEVALLIER  
Sébastien CANDEL  
Jean-Jacques CHARRIER  
Patrick COZZONE  
Gilles DAMBRINE  
Michel DEVILLE  
Hervé DOREAU  
Stefan ENOCH  
Gilles FLAMANT  
Rainer FRIEDRICH  
Boris GRALAK  
Thierry LE MOGNE  
Philippe LOUBATON  
Dmitry PEAUCELLE  
Marie-Christine ROUSSET-LAGARDE  
Pascale ROYER  
Pierre-Yves SCHOBENS  
Christian TENAUD  
Claude VERDIER



# CSD

# CHIMIE

## *Président*

Jean-Claude BELOEIL

Jean-Louis SCHMITT

Andrea VASELLA

Thomas ZEMB

## *Membres de la section*

Jean-Christophe GIMEL

Florence BABONNEAU

Dorothee BERTHOMIEU

Christelle DELAITE

Arnaud ETCHEBERRY

Jens KREISEL

Anne MERCIER

Isabelle ARTAUD

Philippe BAROIS

Vincenzo BARONE

Yves CHAPLEUR

Claude CHOPARD-CASADEVALL

Jacques COURTIEU

Étienne DUGUET

Gilles FRISON

Jean-Jacques GIRERD

Marie-Claire HENNION

Catherine HERVÉ DU PENHOAT

Maryse JOLY

Jacques LIEVIN

Jean-Christophe LOISON

Francis LUCK

Françoise MAUGÉ

William MOTHERWELL

Edmond PAYEN

Michel PFEFFER

Jean-Yves PUY

Yves ROLLAND

Catherine ROYER

## AVANT PROPOS

Ce rapport a été rédigé par le Conseil Scientifique de l'Institut de Chimie, il ne constitue en aucun cas un résumé des rapports des sections du comité national. Il a pour objectif d'extraire les grandes lignes des évolutions prévisibles. Nous conseillons au lecteur de se reporter aux documents des sections pour accéder aux informations complètes et précises. Ce document résulte d'une conception collective, il en découle obligatoirement des différences rédactionnelles pour les différents paragraphes.

Par rapport à notre précédent rapport (version 2006, mais paru en décembre 2007), nous avons fait le constat que beaucoup d'idées exprimées alors, restaient valables. Donc nous nous sommes clairement et ouvertement appuyés sur ce rapport pour prendre en compte les évolutions que nous avons

constatées. Le lecteur qui comparera ces deux versions, pourra trouver des paragraphes identiques : nous assumons ce fait, il signifie simplement que les idées évoquées sont toujours d'actualité.

## 1 – LES ENJEUX

### 1.1 CHIMIE : ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

À chaque siècle ses enjeux, le XXI<sup>e</sup> aura à composer avec une évolution climatique plus ou moins prononcée, avec un besoin d'énergie en croissance permanente, avec une compétition de plus en plus forte sur l'accès aux ressources de métaux rares, aux énergies fossiles, autant d'enjeux stratégiques pour lesquels la recherche en sciences chimiques devra apporter des contributions indispensables.

Pour la première fois dans son histoire, l'activité humaine infléchit pour partie le cours du cycle des climats et se trouve confrontée directement avec une notion de limitation de ses ressources. Beaucoup de données climatologiques ou de projections économiques convergent vers ces constats alarmants. Les choix politiques et technologiques qui seront faits à l'échelle de la planète pour maîtriser le bilan énergétique, pour limiter les rejets, pour gérer le patrimoine en ressources de notre planète, seront déterminants dès les trois premières décennies de ce siècle.

Ils atténueront ou amplifieront les bouleversements géopolitiques qui s'annoncent, les choix en matière de recherche seront décisifs dans cette perspective. L'accès au développement est une conquête due en partie à la progression de nos connaissances en chimie, et les sciences partenaires, en particulier la physique et la biologie. Cette progression a bouleversé le mode de vie d'une partie des sociétés

humaines en créant les conditions d'un accroissement spectaculaire de l'espérance de vie et en modifiant sensiblement le cadre de vie, à présent façonné par des avancées technologiques fulgurantes. La grande question est celle de la pérennité de ces avancées et de leur partage par le plus grand nombre qui sont loin d'être acquis. Une réponse positive impose, c'est à présent une évidence, le passage d'une culture de développement sans limite, à une culture de développement « durable ». Ce passage est et sera d'une extraordinaire complexité au moment où des pays tels que l'Inde ou la Chine sont en train d'atteindre un niveau de développement comparable à ceux des pays dits développés. L'accès incontestable, à la manne énergétique et au développement technologique pour plusieurs milliards de nouveaux individus, sera-t-il compatible avec le maintien d'un contrôle de l'environnement et des accès aux ressources ? Cette interrogation pose un défi majeur qui est loin d'être gagné. Si l'on se penche sur les questions de changement de climat sous l'effet d'une accumulation des gaz à effet de serre et de consommation énergétique les observations sont totalement liées. Il est important de pouvoir affiner la compréhension des mécanismes d'action des émissions liées à l'activité humaine. Ceci revient à évaluer en parallèle les aspects « polluants » mais aussi, dans certains cas, « apparemment bénéfiques » des émissions de gaz et des aérosols.

Les projections parlent d'elles mêmes : progression de 60% présumée pour la consommation en produits pétroliers entre 2000 et 2020, augmentation de 150% de la consommation d'électricité dans les pays d'Asie, la concentration en CO<sub>2</sub> déjà en augmentation d'un tiers par rapport à son niveau pré-industriel, sont quelques chiffres qui sont peu compatibles avec la garantie que l'on ne dépassera pas le seuil considéré comme critique d'un doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> par rapport au niveau pré-industriel. Si l'on considère les besoins en matières premières, des constats similaires peuvent être établis.

Dans un tel contexte imbriquant énergie, climat et gestion des ressources, l'effort de

recherche tant fondamentale qu'appliquée devra être largement amplifié, coordonné à l'échelon national, européen et mondial.

Sur cette triple cible, les missions prioritaires pour la chimie se répartiront sur plusieurs axes. Il faudra d'abord consolider les acquis récents et surtout trouver de nouvelles pistes en matière de consommation d'énergie fossile. Dans un contexte d'expansion, le maintien d'un bilan CO<sub>2</sub> «raisonnable» impose un effort sans précédent qui concernera les secteurs consommateurs tels que : industries, agriculture intensive, transports, habitat et éclairage. L'enjeu sera multiple. Il résidera d'abord dans notre capacité à créer une chimie économe en énergie, pointilleuse sur ses bilans matière tant au moment de la synthèse qu'à celui de la destruction des produits qui impliquera des capacités de recyclage importantes, voire totales pour certaines filières industrielles. La partie non recyclée devra faire l'objet d'évaluation de toxicologie sur la cellule et l'organisme, ainsi que sur les biotopes. Pour les matériaux d'usage, le cycle de vie doit être considéré dans son ensemble et conduire autant que possible à des publications ouvertes en amont des procédures liées à «REACH».

Ces impératifs passeront par un recours permanent à la mission principale du chimiste qui est de comprendre, de transformer et d'utiliser la matière. Le défi de la synthèse et de l'élaboration dans des environnements réactionnels de plus en plus complexes sera à relever. Il faudra se doter des moyens de produire, de consommer et d'éliminer «différemment» en infléchissant très sensiblement les pratiques de notre «civilisation du carbone» dans laquelle nous évoluerons encore pour quelques décennies.

Une seconde mission sera de contribuer à dominer la contradiction majeure du moyen terme, celle de l'augmentation sensible de notre taux d'émissions en CO<sub>2</sub> probable au moins jusqu'en 2030. Ce constat nous impose, aux côtés des sciences de l'univers, de progresser sensiblement dans l'amélioration de nos connaissances sur la dynamique réactionnelle/cinétique de la chimie de l'atmosphère

et des océans, donc dans notre capacité à essayer de trouver des solutions alternatives et transitoires sur le bilan CO<sub>2</sub>. Le captage partiel de nos émissions passe par une recherche ambitieuse sur les stratégies d'un stockage «sûr», par des tentatives de correction des dérives du bilan CO<sub>2</sub>, par un déplacement de notre recours systématique aux produits carbonés fossiles au profit de ceux issus de la biomasse sans abaisser notre capacité à assurer l'auto-suffisance alimentaire pour tous. Toutes ces cibles supposent des avancées, voire des ruptures conceptuelles, tant en chimie fondamentale qu'en génie chimique.

Vient à présent la nécessité de provoquer une rupture significative avec une diversification beaucoup plus importante des sources énergétiques. Là encore, la chimie sera un des acteurs majeurs. Elle doit par exemple contribuer à améliorer les systèmes pour la conversion de l'énergie solaire dans ses composantes thermiques ou photovoltaïques, contribuer à établir des voies nouvelles de conversion sur la base de systèmes hybrides ou dans la mise en œuvre de systèmes à très hauts rendements. L'autre domaine important pour l'approche chimique est celui de la filière nucléaire qui représente une source importante d'énergie à faible émission de CO<sub>2</sub> dans ses phases de production. La quatrième génération de réacteurs à neutrons rapides prévoit une augmentation d'un facteur 500 de l'efficacité énergie/kg de combustible, et une réduction de la durée, ce qui ouvre de nouveaux pans entiers de chimie séparative à explorer en chimie des matériaux et des procédés. Dans ce domaine au-delà de la mise en œuvre de nouvelles générations de centrales, il y aura des enjeux très forts pour la chimie autour du cycle du combustible et du devenir des déchets nucléaires, dont la durée «effective» est à réduire suivant la loi de 2006, par incinération.

Reste le défi le plus ambitieux : celui du passage à une source d'énergie propre avec un bilan CO<sub>2</sub> nul ou minime ou encore la «promesse» d'un accès à une civilisation de l'hydrogène. C'est possible et l'on sait que cela passera obligatoirement par des avancées, des décou-

vertes, dans la maîtrise des sources, des sites électro-catalytiques, des matériaux de stockage ou des membranes. Dans chaque secteur, les besoins en recherche fondamentale seront énormes tant au cœur de la discipline que dans les interactions avec la physique, la biologie, encore faudra-t-il les atteindre !

Dans le domaine des bio-énergies (bio-chaleur, bioélectricité et biocarburants) issues de la biomasse, les biocarburants de seconde génération, *i.e.* utilisant la plante entière et acceptant une biomasse d'origine très diversifiée (paille, bagasse, bois), devraient se substituer aux carburants de première génération utilisant la fraction noble de plantes à vocation alimentaire. Les voies possibles de production de ces biocarburants pour répondre aux nouvelles contraintes sur les émissions de CO<sub>2</sub> ne sont pas encore établies à ce jour. Deux voies principales sont actuellement envisageables, à savoir une voie enzymatique et une voie thermochimique, voies que la chimie (catalyse) devrait permettre d'optimiser par la mise au point de procédés mixtes de valorisation de cette biomasse pour la production de ces biocarburants.

Cette biomasse de « seconde génération » fait déjà l'objet de travaux importants pour la mise au point de nouveaux matériaux agrosourcés. Ces travaux devraient tirer profit de la production de synthons biosourcés. Ainsi, pour l'établissement d'une économie basée sur les bio-ressources, le développement et l'implémentation des procédés de bioraffinerie est d'une absolue nécessité. Dans ce cadre, la chimie a un rôle primordial à jouer tout comme dans le cas d'une raffinerie « conventionnelle » basée sur le traitement et la conversion des pétro-ressources. Cependant, contrairement aux pétro-ressources dont les variations en nature et composition sont « relativement » restreintes, sous les termes « bio-ressources » voire « biomasse » sont regroupés des composés de nature très différente, citons la cellulose, l'hémicellulose, les huiles, la lignine, etc. Ainsi, tout un éventail de technologies spécifiques doit être développé pour convertir de manière rationnelle chaque fraction, ce qui implique notamment l'élaboration de nombreux procédés

basés notamment sur la thermochimie et la catalyse. Ceux-ci constituent le cœur des technologies qui seront implémentées dans les bioraffineries appelées à produire les nouveaux synthons de l'industrie de transformation.

Enfin, si aujourd'hui l'emploi des algues pour la production d'énergie connaît un intérêt grandissant, leur potentiel, et en particulier celui des algues de culture aux caractéristiques contrôlées, en tant que « Bio-ressource » pour ces bioraffineries est négligé. L'emploi de ces algues permettrait d'évaluer le potentiel de cette « bio-ressource » pour la fabrication de synthons à haute valeur ajoutée.

Dans les enjeux environnementaux, le dernier volet de la mission des chimistes sera celui de la gestion des matières premières et de l'obligation environnementale. Sur le plan économique, il faut considérer leur récupération. Il est évident que cela passera par un travail intensif et inventif, tant en génie chimique qu'en chimie fondamentale dans toute la diversité de nos approches. On peut considérer que les mines de demain seront tout autant les sites miniers tout autour de la planète, que nos sites de collecte de déchets. La maîtrise du cycle des métaux rares et autres ressources chimiques stratégiques, représenteront des enjeux majeurs dans les prochaines décennies. Le chimiste dont la principale occupation est de travailler « la gestion et l'économie d'atomes » sera là encore au centre des défis.

## 1.2 CHIMIE POUR LE VIVANT ET LA SANTÉ

A côté de la nécessité de développer de nouveaux outils chimiques pour comprendre les processus biologiques fondamentaux, un des champs majeurs d'application de la chimie en biologie est la recherche de nouvelles stratégies thérapeutiques. Cette recherche autour du médicament est par essence pluridisciplinaire avec une implication incontournable de la chimie : il n'y a pas et il n'y aura pas de médicament sans chimie ! L'interface

avec la biologie doit conserver la place centrale qu'elle occupe dans les objectifs d'application de la chimie. Les progrès n'ont peut être pas eu la rapidité escomptée, mais ils sont là et l'effort doit être poursuivi. Il est impératif d'accorder la plus grande attention à la réciprocité des moyens, des concepts et des méthodes apportés par la biologie et la chimie.

Après l'émergence rapide de la génomique, de la protéomique, de la glycomique et de la lipidomique, nombre de nouvelles cibles thérapeutiques ont été identifiées et traitées individuellement en termes de caractérisation et de recherche de molécules les visant. Si cette approche est encore loin d'être épuisée, il est probable que dans les années à venir elle sera plus intégrée avec une finalité affichée de rechercher les partenaires biologiques en interaction directe avec la cible initiale choisie (rôle dans la signalisation, identification de voies métaboliques...). Ceci aura pour conséquences la caractérisation de systèmes plus complexes de type protéine-protéine, protéine-acide nucléique, protéine-glucide et protéine-lipide *in vitro* et *in cellulo*. Le « candidat » médicament pourra alors avoir pour rôle de réguler l'activité de la cible en amont. La chimie physique intervient à ce niveau avec une caractérisation structurale et dynamique de ces complexes et l'étude thermodynamique de leurs interactions afin de découvrir les mécanismes de leur fonction biologique. On peut commencer à dire que cette évolution atteint désormais un point de complexité qui induit une tendance nouvelle. Nous allons vers le développement de thérapies plus ciblées jusqu'à des thérapies plus personnalisées, avec les modifications sociétales au niveau national et même mondial que cela implique. Ceci ne doit pas être un frein à la poursuite de recherches sophistiquées, mais doit être pris en compte.

Les défis thérapeutiques du présent et du futur sont et seront centrés autour des maladies auto-immunes, des maladies orphelines, du cancer, de la douleur, du vieillissement et des maladies neuro-dégénératives. Ainsi, l'interface chimie-neuroscience est-elle appelée à se développer tant les spécialistes des neuro-

sciences sont maintenant demandeurs d'une approche moléculaire qui est l'art du chimiste.

Le rôle majeur pressenti de la thérapie cellulaire est en train de se concrétiser : les premiers traitements personnalisés de ce type apparaissent aux USA. La chimie jouera un rôle incontournable dans l'identification ou la création de facteurs moléculaires de différenciation des cellules souches.

La métabolomique est maintenant en place, elle permet d'associer des défauts métaboliques à des maladies (rares) voire à des anomalies génétiques. L'étude du métabolome nécessite la création de plateformes regroupant divers équipements couplés entre eux, tels que RMN, calculs statistiques, HPLC et spectrométrie de masse. Le processus est en route, il faut le maintenir. Une nouvelle « omique » est en train d'apparaître : l'étude du métallome, de l'homéostasie des métaux et de l'identification de leurs transporteurs. C'est un domaine nouveau en plein essor.

Lorsque l'on parle du médicament, on pense à une molécule de taille petite ou moyenne, souvent issue de milieux vivants. Ces dernières années, ce schéma ancien a été bouleversé par les techniques de modélisation et de criblage *in vitro* et *in silico*. Les techniques de criblage *in vitro* bénéficient de la création de la chimiothèque nationale à laquelle est maintenant adjointe une bibliothèque nationale. Les techniques de « docking virtuel » devront encore évoluer de façon à pouvoir prendre en compte les interactions des molécules avec les centres métalliques qui jouent un rôle fondamental dans l'activité de certains systèmes biologiques. Le principe même de l'arrimage moléculaire (alias « docking ») doit s'élargir pour prendre en compte l'adaptabilité et la souplesse des protagonistes, ce qui demande une nouvelle programmation et des moyens de calcul plus importants. Les molécules actives prennent majoritairement leur origine dans la diversité du monde vivant, végétal ou marin. Il faudrait éviter « un effet d'accordéon » dont la recherche scientifique est coutumière. Il semble donc nécessaire de maintenir et de développer la chimie des substances naturelles, en améliorant son rendement

par l'automatisation des procédés de criblage tout en maintenant une recherche active dans le domaine de la modélisation.

Les interactions de la chimie avec le domaine de la santé ne s'arrêtent pas au médicament au sens strict. Il faut y inclure les procédés de diagnostic qui ont un développement exponentiel, en particulier lorsqu'ils s'appuient sur des méthodes totalement atraumatiques, avec une réduction du caractère invasif. Ces procédés font appel à des méthodes physiques qui sont souvent des évolutions de méthodes d'analyse utilisées en chimie (IRM/RMN, IRPE/RPE, méthodes optiques et associées à la spectrométrie de masse...). Pour aller plus loin, toutes ces méthodes nécessitent la création de nouvelles molécules (produits de contraste en IRM, micro-bulles fonctionnalisées pour les ultrasons, produits marqués pour la tomographie par émission de positons, molécules lumineuses/fluorescentes pour les méthodes optiques). La création de ces nouvelles molécules peut entraîner la nécessité de développer des techniques particulières comme la synthèse rapide de molécules « chaudes » (Tomographie par Emission de Positons (TEP)). Ces molécules employées pour le diagnostic évoluent vers une plus grande spécificité : on parle de produits de contraste « intelligents », d'imagerie de l'expression des gènes... On veut également disposer de traceurs dont l'activité peut être déclenchée « de l'extérieur » (agents de contraste CEST et PARACEST par exemple). Toute une recherche extrêmement valorisante est en train de s'ouvrir. La recherche française et les industriels français sont encore « bien placés » dans ce domaine particulier de la chimie, il faut poursuivre l'effort ! Dans ce dernier domaine, une évolution se fait sentir vers la mise en œuvre de techniques de diagnostic « multimodales ». Pour aller plus loin (en résolution, en sensibilité...), il faut utiliser plusieurs techniques simultanément (IRM/Biophotonique, TEP/RX...). Là encore, la chimie doit prendre en compte cette évolution pour créer des traceurs multimodaux.

Une tendance récente conduit à associer le produit de diagnostic et le médicament, on parle de « théragnostic ». On se rapproche cette

fois des techniques de vectorisation. On veut délivrer au bon endroit la bonne molécule et pouvoir suivre le processus par imagerie tout en y associant un diagnostic !

D'un point de vue général (médicaments, produits de diagnostic), il ne suffit pas de produire une molécule active, il faut garder son activité jusqu'à sa cible. Des techniques de vectorisation de plus en plus sophistiquées apparaissent. Par exemple, il n'était pas rare d'entendre que les peptides ou les oligonucléotides ne seraient jamais des médicaments en raison de leur faible stabilité dans un milieu vivant. On sait désormais préserver ces molécules et les libérer au niveau de leur site d'activité. La vectorisation est une discipline qui doit continuer à prendre de l'ampleur dans les prochaines années. Elle fait appel à la chimie, mais également à la physique des milieux dispersés et aux nanotechnologies.

Autre discipline où la chimie intervient : la conception de nouveaux matériaux dans des domaines très divers, en rapport avec la santé. Nous en sommes à la phase d'induction en matière de matériaux à surfaces biocompatibles, tissus et liquides biologiques artificiels. Les études sur ces nouveaux matériaux qui font intervenir la chimie de synthèse, la chimie des polymères, la chimie du solide, la physique des matériaux devraient être plus développées dans notre pays. Dans ce domaine, une évolution riche de possibilités consiste à faire appel à des disciplines scientifiques parfois éloignées : on peut prendre pour exemple récent la conception d'un cœur artificiel à partir de techniques aéronautiques.

Un autre champ majeur d'application de la chimie en biologie concerne les domaines de la toxicologie (notamment avec la mise en place des procédures REACH), du vieillissement, de la bioremédiation. Les métaux sont présents dans plus de la moitié des protéines et interviennent dans plusieurs domaines clés de la santé et dans le développement de la vie végétale et animale. La recherche en chimie bio-inorganique – qui est en expansion – a ainsi permis des avancées majeures dans la compréhension des relations structure-activité dans le domaine de la photosynthèse.

Des retombées importantes dans la conduite de telles recherches structurales de la réactivité sont attendues dans les domaines de l'énergie et de la valorisation des ressources naturelles. Ces recherches doivent impérativement être poursuivies. La chimie est souvent associée à la pollution dans l'opinion publique, il faut informer ce même public de la nécessaire action de la recherche en chimie en matière de dépollution, mais également à la source, pour éviter de polluer!

### **1.3 NANOSCIENCES ET NOUVELLES TECHNOLOGIES**

On considère ici l'état des lieux en 2010 en regard de la situation en 1992 et en 2003, dates du grand colloque de prospective consacré à la chimie des systèmes moléculaires organisés selon la terminologie de l'époque et du rapport RST Corriu-Blanzat de l'académie des Sciences. Force est de constater que la convergence du domaine des cristaux liquides, des polymères et des colloïdes annoncée a eu lieu dans les publications, via les concepts et les méthodes, pas dans les équipes qui restent, sauf exceptions, chacune dans leur spécialité. La convergence physique-chimie-biologie annoncée a eu lieu dans le domaine des théories, où la mécanique statistique prend une place prépondérante. Du côté expérimental, la grande avancée reste l'AFM et les méthodes thermodynamiques (osmométrie, diffusion de rayonnement) : on commence à connaître de plus en plus d'équations d'état de fluides complexes.

Comme dans le domaine des particules élémentaires, dans l'étude des dispersions fluides, émulsions, microémulsions, la grande affaire des dix prochaines années sera la mise en cause des interactions au-delà du premier voisin, réduites aux seules interactions dites DLVO, électrostatique et Van der Waals. Les propositions foisonnent dans le domaine des nanosciences : forces d'hydratation, de protrusion, effets spécifiques, interaction hydrophobe. Tous ces effets sont à la base de

formulations industrielles dans des nombreux domaines (détergence, cosmétique, colles, peintures, pâtes, dispersions, aliments industriels, flottation, lubrifiants, mousses...). Mais le pouvoir prédictif des théories sur la stabilité de ces fluides reste encore faible : les théories prédictives raisonnablement paramétrées existent sur la tension de surface des eaux salées, mais aucune sur la stabilité très différente de mousses de solutions salines. La réactivité chimique des nanoparticules a fait l'objet de nombreuses études : la solubilité, au sens de la concentration en équilibre avec des nanoparticules de composition chimique donnée augmentant avec l'état de dispersion commence à être maîtrisée. La solubilité d'une molécule dans un fluide complexe donné reste du domaine de la recherche statistique multi-paramètres. Les avancées sont importantes, notamment grâce aux sources de neutrons et aux grands instruments (diffraction et microscopie/tomographie à rayons X). Les instruments de la thermodynamique restent à miniaturiser (micro-électrodes spécifiques, micro-calorimètres, transformation d'AFM, etc.). Des progrès instrumentaux dérivés, destinés aux nano-objets, devraient être encouragés via des appels d'offres spécifiques. Le développement de la microscopie à rayons X mous est à juste titre une priorité de SOLEIL et sa mise en route s'accompagnera sans doute de surprises, notamment pour les systèmes à trois composants comme les triplets électrolyte, les matériaux électro-actifs, les collecteurs ou les gels auto-réparants.

Depuis l'identification par la communauté sol-gel de briques élémentaires, et la reconnaissance de l'identité de ces briques élémentaires avec les assemblages simples d'amphiphiles et de polymères au niveau de la réactivité et des interactions faibles, il y a convergence dans la compréhension des limites physico-chimiques : dilution, concentration, voire floculation. Au contraire, tout ce qui concerne la morphologie de l'échelle méso à l'échelle macroscopique reste un mystère : le paradigme est ici la forme de la tache de café, un problème non résolu. La communauté de matériaux granulaires et des fluides intelligents devrait donner plus

d'importance à la chimie des interactions entre molécules constituant un nano-objet.

Dans le domaine de la sécurité, il y a encore peu de cohérence dans les « normes » qu'il serait nécessaire de définir. Un problème essentiel se pose pour le développement inéluctable des nanosciences, c'est celui de l'acceptation des nanotechnologies par la société. Elle se heurte à des questions pour lesquelles nous manquons de connaissances validées et normalisées : incertitude sur les objets (nanoparticules, nanodispositifs...) et sur leur comportement, sur la toxicité et les risques, et donc sur la réaction des marchés et des individus. Une action prioritaire doit donc être de faire émerger et de structurer un milieu de recherche en sciences sociales et en toxicologie pour traiter de ces questions, et ceci en relation étroite avec les laboratoires de recherche impliqués dans les nanosciences et nanotechnologies.

Propriétés et concepts des nanomatériaux et des nano-composants s'écartent largement de ceux connus pour les métaux, oxydes, verres ou semi-conducteurs massifs contenant des millions de milliards d'atomes ou molécules. Un petit amas détermine sa « signature fonctionnelle » par sa petite taille, sa forme, son environnement, autant que par les briques élémentaires à partir desquels il est construit. Ce concept s'applique aussi au vivant.

Concernant les applications de ce domaine, on notera que dans l'ensemble des pays industrialisés, un effort considérable est en effet consacré aux nanosciences, sources d'innovations technologiques futures. Concevoir, fabriquer des nano-objets, comprendre leur fonctionnement, fabriquer industriellement des composants en intégrant ces nouveaux objets constitue une feuille de route pour la science et la technologie en ce début du XXI<sup>e</sup> siècle. Les nanosciences et les nanotechnologies sont aujourd'hui considérées comme une des clés majeures de l'activité économique de demain, car elles jouent un rôle décisif dans les domaines stratégiques du vivant et de la santé, de la sécurité, de l'énergie ou du recyclage, nécessité centrale de la chimie du développement durable.

La nanochimie est par ailleurs le passage obligé entre la nanophysique et l'exploration du vivant (imagerie, manipulation d'objets moléculaires au sein de structures vivantes et *in fine* conception d'objets biocompatibles et guidage de médicaments dans l'organisme malade).

La façon de faire vivre la convergence de la chimie, acteur central, entourée de la biologie et principalement de la biochimie d'un côté et de la physique dans son acception principalement physico-chimique de l'autre, sera une clé du succès futur dans ce domaine. Des champs nouveaux comme l'auto-assemblage en liquide ionique ou sous l'effet d'un champ extérieur apparaissent. Le CNRS dans la diversité de ses disciplines a une responsabilité centrale dans ce défi scientifique majeur. La marge de progression est grande : un éditorial récent de l'Actualité chimique proposait de chercher des différences entre nanosciences et physico-chimie éventuellement biologiques sans qu'un consensus n'ait été trouvé.

## 2 – LA PLACE DE LA CHIMIE PAR RAPPORT À CES ENJEUX

Dans cet ensemble où les besoins sociétaux que nous venons de parcourir pèseront d'un poids permanent, les organismes de recherche et le CNRS en particulier devront assumer leur rôle et promouvoir un effort de recherche fondamentale sans précédent, ménageant les espaces de liberté importants, garants de découvertes majeures, articulant sans retenue certaines opérations avec le monde de la R&D industrielle. Il ne faut pas évoluer dans un contexte d'effet de « mode ou d'urgence » source de déséquilibre dans les niveaux de financement. C'est un aspect « stratégie scientifique » qui est très présent dans les discussions du CSD (CSI) chimie. Les données « géo\_scientifico »-stratégiques de la planète avec toutes leurs ambiguïtés et conflits d'intérêt

se transposeront inévitablement à l'échelle des établissements et agences de recherche qui devront bien réfléchir aux conséquences de leurs choix stratégiques, à la pertinence des réponses qu'ils apporteront et à la manière de répartir les sources de financement en veillant à ne pas mettre « tous les produits dans le même bûcher ». Dans cette situation de modification rapide, la chimie tient une place centrale. Elle a une capacité à créer des entités nouvelles allant de l'échelle moléculaire aux édifices complexes et à comprendre sur plusieurs facteurs d'échelle les évolutions des systèmes. Celle-ci sera un des moteurs de la communauté scientifique pour répondre aux défis annoncés. Dans les deux siècles écoulés elle a été un pilier essentiel de l'aventure scientifique de l'humanité en étant en grande partie à l'origine de la « civilisation du carbone » qui pose problème aujourd'hui mais qui nous a propulsés dans un confort de vie. Elle a les atouts pour en corriger les effets néfastes si on lui en donne les moyens et les missions. Elle sera à nouveau, en partenariat étroit avec les autres disciplines, une force de proposition et de création qui aboutira peut-être à la création d'une « civilisation de l'hydrogène ». Il lui faudra pour cela transformer en partie ses approches, peut être se recomposer en combinant résolument les compétences présentes dans ses sous-disciplines pour s'attaquer à la fois à des mécanismes réactionnels de plus en plus complexes et aux conditions dans lesquelles ils sont menés. Les concepts de chimie verte et de chimie ciblée seront la poutre centrale du développement de la discipline. La chimie aura aussi à amplifier son interdisciplinarité.

## 3 – LES GRANDS DÉFIS DE LA CHIMIE

### 3.1 SYNTHÈSE ET ÉLABORATION

Répetons-le, parmi les sujets disons « bien établis » dans le domaine des Sciences Natu-

relles (la physique, la biologie, l'astronomie), *la chimie restera toujours unique*, parce que, comme Berthelot l'avait dit, « La Chimie crée son objet » (1860). En conséquence, *la synthèse restera toujours au cœur du sujet*, surtout quand, dans un domaine aussi vaste que la chimie, les chimistes d'aujourd'hui veulent contrôler les propriétés des molécules pour le bénéfice de l'homme dans un environnement fini ou il faudra dès la conception, tenir compte de la toxicité du produit et des sous-produits.

Ainsi, quels médicaments et quels soins médicaux sans molécules pour la chimiothérapie, quels matériaux originaux sans la synthèse et l'élaboration des éléments moléculaires de l'architecture? Quelles constructions sans cimentaux propriétés d'assemblages toujours plus performantes? Quelle informatique même, sans la réalisation de « wafer » en silicium ou autre arséniure de gallium à la pureté localement contrôlée? Quels afficheurs extra-plats sans l'élaboration de molécules cristallines aux propriétés électriques ou magnétiques contrôlées... quels parfums... quels goûts...? La liste n'est pas exhaustive.

Parmi nos collègues scientifiques actifs dans les autres sujets, il est souvent considéré que la synthèse est un exercice trivial, et qu'on peut dessiner une molécule le vendredi soir et en attendre la livraison le lundi, de préférence le matin. Rien n'est plus loin de la réalité.

Les grands défis concernant la synthèse seront de définir de nouvelles architectures moléculaires ayant des propriétés nouvelles ou ciblées, et leurs voies d'accès. Dans cette quête, l'analyse de l'activité catalytique des systèmes biologiques dans toute leur biodiversité continuera d'être d'une importance fondamentale pour développer une chimie bio-inspirée, nouvelle et douce. La synthèse totale aura, bien entendu, un rôle important, par le choix des cibles à atteindre et par les nouvelles méthodes développées ou testées, sans oublier la biodiversité comme source de molécules, notamment les végétaux.

Les défis principaux concernent :

- les réactions multi-composantes et en cascade

– la limitation du nombre d'étapes en synthèse totale et avec des rendements quantitatifs, le contrôle absolu sur les régio- stéréo- et énantiosélectivités

– la création de catalyseurs toujours plus performants en terme d'activité, de sélectivité et de recyclabilité-synthèse à haut débit, et l'utilisation déjà classique des micro-ondes associées aux ultra-sons, sels fondus à basse température, et à très hautes pressions.

– l'étude des acides nucléiques (si-RNA, m-RNA, télomères) et la recherche d'agents antiviraux jointe à l'émergence d'une immuno-chimie.

Toutes ces étapes ne seront franchies que dans la mesure où la compréhension des mécanismes réactionnels et de la reconnaissance moléculaire aura été encore améliorée.

L'étude spectroscopique détaillée du déroulement des réactions est désormais à la portée des chimistes grâce aux développements récents des techniques *in situ* et *operando* (en particulier par RMN, masse et infrarouge). Associée aux simulations de systèmes réels désormais à la portée de la chimie quantitative, ces techniques permettent une description beaucoup plus factuelle des mécanismes. Elles permettent en conséquence un meilleur contrôle des processus, y compris au niveau industriel, en évitant les erreurs d'expérimentation, les « boîtes noires » de procédures empiriques et le gaspillage des ressources associé aux résultats inexploitable de réactions incontrôlées, donc à la destruction de batchs entiers au niveau industriel

L'émergence accessible d'environnements de micro-fluidique permettra des gains de temps et d'efficacité car des gros volumes pourront être traités par de petits réacteurs.

Dans ces aspects de synthèse et de méthodologie, l'un des défis les plus importants des 10-20 prochaines années concernera la *chimie propre*, respectueuse de l'environnement et comptable des ressources naturelles. Cette chimie rénovée acquiert aujourd'hui ses lettres de noblesse, poussée par les réactions justifiées aux problèmes de modification clima-

tique de la planète, de limitation des gaz à effet de serre, de développement durable et de préservation de l'environnement et des ressources. Les mots clés sont ici :

– les réactions avec économie d'atomes

– la catalyse, notamment asymétrique, homogène ou hétérogène, organométallique, enzymatique ou purement organique

– la chimie dans l'eau ou dans de nouveaux milieux réactionnels respectueux de l'environnement, comme le CO<sub>2</sub> super-critique.

Cette révolution nécessitera la recherche de méthodologies des réactions nouvelles respectant les contraintes d'environnement. A titre d'exemple, on pourra mettre en avant les thèmes suivants :

– la récupération et la valorisation du CO<sub>2</sub> et du N<sub>2</sub>

– la fonctionnalisation directe de liaisons C-H, en évitant la formation de sels en fin de processus réactionnel

– l'organo-catalyse complémentaire à la catalyse organo-métallique

– le développement de nouvelles méthodes d'activation.

Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive. Dans toutes ces approches, il faut rechercher des avancées méthodologiques conceptuelles comme les couplages organo-métalliques, la métathèse et ses utilisations, qui ont bouleversé les stratégies de synthèse. D'une certaine façon, la gageure est de reconstruire en profondeur la discipline sur la base des principes évoqués ci-dessus.

Cette reconstruction touchera les domaines les plus vivants de la discipline et en priorité la *synthèse multi-étapes* qui concerne divers secteurs industriels importants comme la santé publique, l'agro-alimentaire et, plus récemment le monde des nano-objets.

Dans ce contexte, les concepts originaux associés à la chimie supramoléculaire et aux processus d'auto-association devraient jouer un rôle important. La compréhension du rôle

des interactions faibles (non covalentes) avec et au-delà du premier voisin (effet de solvant, effets spécifiques ioniques) devrait conduire à des avancées spectaculaires dans le domaine du médicament (vectorisation et pro-drogue).

L'étude des transformations biologiques et des produits naturels restera une source intarissable de connaissances à mettre en valeur en chimie. L'analyse de voies biosynthétiques, leur modification et leur utilisation comme nouvelle source de molécules plus ou moins complexes par le chimiste doit aussi contribuer à cette démarche.

Il ne faut pas oublier que la synthèse d'aujourd'hui reste encore une science jeune. Il est nécessaire d'investir dans les aspects fondamentaux d'une chimie de synthèse pour vraiment contribuer partout à l'élaboration des molécules pour la recherche multidisciplinaire.

L'ensemble des défis évoqués ci-dessus fait surgir inmanquablement la nécessité d'une réflexion sur les problèmes associés au recrutement des acteurs de la recherche en chimie, c'est-à-dire une réflexion sur la formation, la sélection et le support des chercheurs.

## 3.2 LES MATÉRIAUX ET LEUR ASSEMBLAGE

### Prospective en chimie macromoléculaire

Les nouveaux matériaux polymères offrant de nouvelles fonctionnalités et des performances accrues seront des moteurs fondamentaux de l'innovation industrielle, pouvant s'appliquer au niveau des technologies et des dispositifs et systèmes pour un développement durable. Ils permettront une compétitivité accrue dans des secteurs tels que le transport, l'énergie, le médical, l'électronique, la photonique et la construction. Ces avancées technologiques se feront grâce :

– au développement de connaissances fondamentales afin de comprendre, à l'aide d'ou-

tils expérimentaux et de modélisation, des phénomènes physico-chimiques complexes, utiles à la maîtrise et au traitement des matériaux. Ceci devrait permettre de synthétiser des structures de plus en plus complexes, capables d'auto-assemblage et dotées de caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques déterminées. La recherche devra s'orienter, entre autre, vers le développement de nouveaux matériaux techniques, capables par exemple d'autoréparation.

– à l'ingénierie macromoléculaire qui servira de moyen permettant le développement de ces nouveaux matériaux. Il sera ainsi nécessaire de développer de nouvelles méthodologies de synthèse permettant un meilleur contrôle de la polymérisation (meilleure définition des structures macromoléculaires impliquant une meilleure maîtrise des matériaux polymères), plus respectueuses de l'environnement, plus sélectives, atteignant de meilleurs rendements, tout en limitant la formation de sous-produits (difficiles à éliminer) et le nombre d'étapes. Ceci implique le développement de nouveaux catalyseurs, plus actifs, plus sélectifs, permettant d'accéder à des polymérisations plus économiques en énergie, ainsi que le développement de solvants non polluants (liquides ioniques, fluides supercritiques...). La synthèse de nouveaux monomères, notamment à partir de ressources renouvelables devra également être explorée.

– aux techniques d'ingénierie à l'échelle nanométrique qui permettront de créer des matériaux fonctionnels et structurels nouveaux, dotés de performances supérieures grâce à la maîtrise de leur nanostructure. Des technologies pour la production et le traitement de ces matériaux devront être développées dans ce but. La recherche devra être centrée, entre autre, sur les alliages et composites nanostructurés, sur l'incorporation de nanoparticules dans des substrats appropriés et sur les matériaux fonctionnels nanostructurés.

Enfin, la prise en compte du cycle de vie du matériau et l'efficacité au regard de l'environnement seront des critères majeurs à prendre en compte. Le devenir du matériau en fin de vie (recyclage, retour au monomère...)

devient actuellement un critère incontournable dans le développement d'un nouveau matériau. Des recherches devront notamment être menées sur le recyclage des matériaux composites en fin de vie.

### Les matériaux de « commodité »

Les polymères de cette classe, basés sur des monomères largement disponibles, sont remarquablement performants en tant que produits de consommation « jetables ». Ils sont fabriqués depuis longtemps et de façon toujours plus massive (de l'ordre de 1 012 t/an). La recherche dans ce domaine vise d'une part à en étendre le domaine d'application en concurrence avec les matériaux de performance, et d'autre part à en assurer la production dans un contexte de disparition programmée des ressources d'origine fossile. L'innovation et -on peut l'espérer- le retour dans un pays comme la France des industries du secteur passeront par l'application des principes du développement durable, en particulier l'éco-design, qui inclut entre autres l'analyse du cycle de vie : conception, production, distribution, consommation et l'élimination-valorisation, étude des pollutions et des déchets générés. Dans cette démarche, les chimistes sont en 1ère ligne et s'orientent notamment vers la valorisation des fibres végétales en tant que source infiniment renouvelable de produits chimiques (synthons bio-ressourcés), la limitation des conséquences environnementales liées au recyclage largement incomplet et poursuivent leurs efforts sur la mise au point de nouveaux systèmes catalytiques.

### Les matériaux avancés

Ils ont toujours été privilégiés par la recherche académique sur les matériaux, car – à défaut de grands volumes de production – ils sont ceux dont on peut espérer les combinaisons de propriétés les plus fascinantes. Ils interviennent dans toutes sortes de dispositifs optoélectroniques, photovoltaïques, laboratoires sur puces, batteries, dispositifs médicaux

implantables ou injectables, etc. Dans le cadre de ces applications, les chimistes du solide et les métallurgistes continuent à imaginer toute une gamme de matériaux innovants en jouant sur de nouvelles compositions chimiques, des méthodes de fonctionnalisation en couches minces et des procédés de texturation sous forme de nanocomposites, de mousses, etc.

D'autres systèmes hétérophasés, structurés à l'échelle nanoscopique grâce notamment à l'ingénierie des copolymères à blocs mais aussi à celle des polymères semi-cristallins, restent une source d'inspiration majeure pour la communauté des chimistes macromoléculaires.

Par ailleurs, les matériaux hybrides organiques-inorganiques, voire biologiques-inorganiques, et les nanomatériaux démultiplient les possibilités de combinaisons, en s'associant notamment avec la chimie supramoléculaire, et autorisent l'interfaçage avec les milieux vivants. Enfin, la synthèse de nanoparticules calibrées et fonctionnelles pour élaborer des matériaux par assemblage contrôlé reste un enjeu majeur dont dépendent le développement en particulier des cristaux photoniques, des métamatériaux, des matériaux multiferroïques, etc.

### Les matériaux bio-inspirés

En s'inspirant de l'incroyable inventivité de la nature et en comprenant les processus naturels tels que la bio-minéralisation des micro-organismes, il est possible de concevoir à pression et température ambiantes des matériaux biodégradables aux formes complexes et à la structuration multi-échelle spontanée.

Ces trois grands défis nécessitent des connaissances fondamentales de très haut niveau : en **chimie** pour concevoir de nouvelles voies de synthèses et identifier les espèces réactionnelles mises en jeu, en **physico-chimie** pour comprendre le rôle des interactions faibles et des champs externes dans la formation des assemblages aux échelles « méso » et plus que jamais **à l'interface avec la physique et les sciences biolo-**

giques pour l'étude des propriétés, d'une part, et la démarche de développement durable, d'autre part.

### 3.3 MÉTHODES D'ANALYSE ET SUIVI DES SYSTÈMES COMPLEXES

#### Analyse

Plus que jamais, la chimie analytique est incontournable dans notre société d'aujourd'hui. Les demandes émanant de l'environnement, de la santé publique et de la sécurité alimentaire sont toujours de loin les plus importantes, mais celles des autres domaines comme la sécurité des personnes, les fraudes et le dopage ou le patrimoine historique sont toujours présentes. Parmi les grands défis de la planète, il faut gérer de façon durable les milieux naturels et anthropiques et appréhender les interactions entre procédés industriels, environnement et sources de pollution. Or comprendre et modéliser les mécanismes de transfert et de migration des composés chimiques dans le temps et l'espace pour évaluer leur impacts environnementaux, maîtriser la qualité des eaux et des sols, améliorer les composés chimiques reposent forcément sur des étapes d'identification et de quantification des substances et de leurs produits issus de la (bio)dégradation. Dans le domaine de la santé, la chimie pour le diagnostic médical, la création d'un nouveau médicament et la compréhension de certaines maladies requièrent aussi des analyses de plus en plus performantes et réalisables à partir de très petites quantités d'échantillons.

Les caractéristiques des demandes analytiques varient d'une demande à l'autre et les verrous technologiques identifiés peuvent alors être différents, mais on distingue principalement des besoins pour développer :

- des analyses exhaustives d'un échantillon complexe par son très grand nombre de constituants, ce qui demande un pouvoir de séparation des composés très grand et une

identification incontestable. Ceci fait appel à des méthodologies assez complexes et sophistiquées

- des analyses de trace, voire d'ultra-traces dans des matrices souvent très complexes
- des analyses très rapides et à haut-débit
- des analyses facilement utilisables sur le terrain (milieu hospitalier, cabinet médical, usine, etc.) ou *in vivo*
- des analyses à partir de quantités très limitées d'échantillon (goutte de sang, fragment d'œuvre d'art...)
- des analyses respectant la spéciation, ce qui est très important dans l'analyse des composés inorganiques et en écotoxicologie.

Dans le domaine des sciences séparatives, ces dernières années ont été témoins d'avancées assez fortes dans l'instrumentation avec des nouvelles phases de très fines granulométrie permettant des hauts débits analytiques sans perte d'efficacité à condition d'être utilisées sous des très hautes pressions. Le couplage des méthodes séparatives avec la spectrométrie de masse a fait de réels progrès, abaissant fortement les limites de détection. La miniaturisation a fait son entrée avec des appareils combinant chromatographie sur puces et spectrométrie de masse ou électrophorèse sur puces.

Malgré ces avancées, les analyses rapides de mélanges très complexes de par le nombre de composés présents (protéomique, produits pétroliers, biomasse, huiles essentielles...) sont loin d'être résolues et constituent encore un réel défi. La chromatographie en phase gazeuse bidimensionnelle intégrale a montré ses performances pour l'analyse des composés volatils et semi volatils comme les produits pétroliers ou naturels. La chromatographie en phase liquide bidimensionnelle est en situation pour devenir une alternative pour l'analyse des protéines, toujours largement analysées par de l'électrophorèse bidimensionnelle sur plaque, ce qui est long et ne permet pas l'analyse des protéines de moindre abondance. Pour cela il faut développer des nouvelles phases séparatives permettant notamment des hauts débits

pour la deuxième dimension et s'aider de la chimométrie pour l'analyse des données.

Malgré les performances en limites de détection, l'analyse de traces nécessite toujours un traitement préalable des échantillons et cette étape reste le maillon faible de la chaîne analytique. Il faut concentrer et purifier dans de nombreux cas, ce qui est très long par les méthodes classiquement utilisées. Comme la rapidité de l'analyse totale passe par celle de cette étape, l'extraction et la concentration sont beaucoup plus efficaces en ciblant uniquement les composés recherchés via le développement de nouveaux matériaux mettant en œuvre des interactions très sélectives basées sur la complexation avec des ligands spécifiques chimiques (calixarènes, dextrans...) ou biologiques (anticorps, polymères à empreinte moléculaire, aptamères, enzymes, récepteurs, protéines...).

La rapidité des analyses oblige une automatisation et donc un couplage en ligne des différentes étapes de la chaîne analytique, ce qui a été l'objet de nombreux développements ces dernières années. Si en plus on veut des analyses respectueuses de l'environnement en ne consommant que très peu de solvants organiques toxiques et autres réactifs et qui soient réalisées à partir d'échantillons de très petite taille, il faut miniaturiser les systèmes analytiques qui peuvent prendre alors la forme de véritables laboratoires sur puce. Leur développement s'appuie sur les nombreux progrès réalisés pour leur fabrication et les travaux réalisés en microfluidique. Si de nombreuses publications attestent de leur potentiel, il reste quelques verrous avant de voir ces outils utilisés de façon routinière avec des échantillons réels pour le diagnostic médical à partir d'une goutte de sang ou pour un contrôle des micropolluants dans le domaine de l'environnement ou de la sécurité alimentaire. Le chimiste analyste doit repenser l'analyse et des efforts restent à faire pour la synthèse in situ de phases séparatives, l'intégration de l'étape de traitement d'échantillon et la détection. Les bioessais, capteurs et biocapteurs sont toujours en plein développement et on observe également de plus en plus des formats miniaturisés, incluant de plus en plus des nanoparticules.

Les biocapteurs électrochimiques utilisant les propriétés catalytiques des enzymes sont un axe fort de recherche en cours. Outre leur faibles dimensions, les atouts des (bio)capteurs combinant électrochimie et microtechnologie sont la possibilité de production de masse à faible coût et leur simplicité d'utilisation. D'autres biocapteurs basés sur la reconnaissance moléculaire (anticorps, aptamères, polymères à empreintes...) ou sur l'utilisation de cellules requièrent souvent un fonctionnement en flux continu, ne serait-ce que pour la régénération de l'élément capteur entre deux mesures. Il y a beaucoup à attendre de la miniaturisation ces prochaines années, bioessais, biocapteurs, et microsystèmes séparatifs pouvant se rejoindre dans un même laboratoire sur puce. Outre les nouveaux matériaux de plus en plus disponibles pour la fabrication de ces systèmes miniaturisés, les progrès réalisés actuellement dans la fonctionnalisation de surface localisée à petite échelle par les électrochimistes ouvrent aussi une nouvelle voie. Leurs applications potentielles sont énormes dans le domaine de la santé, de l'environnement et de la sécurité alimentaire.

## Chimie structurale

La Chimie a développé une palette d'outils structuraux qui couvre un champ d'investigation allant de la molécule unique jusqu'au tissu humain. La sophistication des approches telles que la RMN, la RPE, la Spectrométrie de masse, la cristallographie RX, la cryomicroscopie électronique, les techniques vibrationnelles, les techniques optiques et la modélisation en a fait des disciplines à part entière qui ont connues des avancées significatives au cours des dernières années.

Grâce aux hauts champs équipés de cryosondes, la RMN structurale a franchi un pas avec la première détermination d'une structure de protéine *in-cellulo* par RMN. Les progrès dans tous les domaines de la RMN des biomolécules (acquisition rapide, traitement de signal, exploitation de données, hyperpolarisation, approches multi-techniques) ouvrent la

voie aujourd'hui à la caractérisation des états fonctionnels. La résolution de la RMN du solide se rapproche de celle de la RMN en solution avec l'avantage de pouvoir aborder les agrégats moléculaires comme les fibres amyloïdes, les assemblages, les biomolécules membranaires, et les matériaux. L'installation à Lyon en 2009 du tout premier spectromètre RMN opérant à 1 GHz, équipé pour la RMN des solutions et la RMN du solide, contribuera à ces progrès. De même, l'acquisition de spectromètres RPE impulsionsnels à haut champ et d'imageurs RPE rend accessible des expériences visant le fonctionnement du monde vivant aussi bien que l'évolution des matériaux.

En spectrométrie de masse, des progrès conceptuels et instrumentaux considérables ont été réalisés récemment. Par exemple, le développement d'appareillages à très haute-résolution et de l'imagerie par SM permet de couvrir des applications analytiques aux frontières de la chimie (patrimoine, toxicologie, analyse de traces...). L'analyse de protéines intactes est à présent réalisable pour de très faibles quantités (sub-femtomole aujourd'hui, sub-attomole dans les années à venir) pour des masses moléculaires de plusieurs MDa, permettant l'étude des assemblages complexes.

Du côté des molécules de petite taille, les études spectroscopiques assorties de criblage *in silico* conduisent aux composés capables d'interférer avec des processus biologiques nuisibles mis en évidence par biologie moléculaire. En métabolomique, il s'agit de détecter des signatures de pathologies. Cette approche est en pleine expansion et son transfert vers l'hôpital sera un défi majeur au cours des prochaines années.

On assiste à une véritable explosion des techniques d'imagerie spectroscopique. Avec les sondes fluorescentes, l'imagerie moléculaire a abouti récemment à l'étude du gène unique. Les futurs développements porteront sur l'augmentation de la résolution spatiale et la pénétration intracellulaire grâce au perfectionnement des sondes, des stratégies de ciblage, de l'instrumentation et des méthodes d'analyse d'image. Notons enfin que la création d'une branche de la Chimiothèque Nationale

dédiée aux agents structuraux (sondes fluorescentes, agents de contraste, cryptophanes...) assortie de subventions pour financer leurs synthèses pourrait être un moyen de soutenir ces développements.

L'utilisation des lignes de lumière des grands instruments français (Soleil) ou européens (ESRF) ainsi que des lignes de neutrons a permis de repousser les limites pour les macromolécules biologiques difficiles à cristalliser ou à solubiliser. La combinaison de la cristallographie RX classique avec d'autres approches à basse résolution (SAXS, SANS, et BioXAS) ouvre une autre fenêtre sur les objets au sein d'assemblages multimoléculaires complexes.

Enfin, on observe des évolutions qui sont appelées à s'amplifier dans l'avenir pour l'analyse de la chiralité moléculaire (dichroïsme circulaire vibratoire dans l'infrarouge, reconnaissance de forme par RMN, SM de rapport isotopique...)

Deux autres évolutions majeures, l'une technologique et l'autre organisationnelle, sont en cours dans ces disciplines. La première évolution, technologique, concerne la mise en place de combinaisons multi-techniques et devrait conduire à l'apparition de stratégies originales. Cette évolution touche notamment actuellement la RMN en solution, en couplage avec l'HPLC et la HRMS; la RMN du solide, en couplage avec la microscopie électronique, la diffraction des rayons X ou des neutrons aux petits angles; et enfin la spectrométrie de masse, en couplage avec la spectroscopie en phase gazeuse, l'UV, la mobilité ionique ou la RMN. Ces approches peuvent offrir par exemple la possibilité d'étudier la dynamique moléculaire à une échelle de temps jamais atteinte jusqu'à présent, un atout important pour comprendre les phénomènes biologiques et les relations structure-activité. Il est à noter que le couplage entre plusieurs techniques physico-chimiques ne nécessite pas nécessairement les appareils les plus performants, c'est le couplage qui apporte un « plus » considérable et leur implémentation dans des appareils de laboratoire est à encourager.

L'autre évolution notable en cours dans le paysage de la recherche française est le développement de réseaux de plates-formes à hautes performances. Le modèle en ce domaine est le TGE-TGIR RMN à très haut champ qui, tout en contribuant à la structuration de la communauté RMN française, a permis de mettre à la disposition de la recherche française et européenne le tout premier spectromètre RMN opérant à 1 GHz, ainsi qu'une série d'autres spectromètres haut champs répartis sur l'ensemble du territoire français. D'autres communautés sont actuellement en cours de structuration sur ce modèle, notamment celle de la RPE et celle utilisant la spectrométrie de masse par résonance cyclotronique des ions (TGE «FT-ICR à très haut champs»). Le développement de ces plates-formes multi-centres devrait permettre de rationaliser les investissements à l'échelle nationale tout en facilitant les interactions entre physico-chimistes et chimistes/biologistes.

### **Caractérisation multi-échelle des matériaux**

Les recherches dans le domaine des matériaux requièrent de plus en plus d'études fines des propriétés structurales, dynamique et électroniques pour lesquelles une augmentation de la résolution spatiale, temporelle et énergétique est nécessaire. Un des défis actuels est de caractériser les matériaux sur une gamme d'échelles très étendue, du nanométrique au millimétrique, et dans des conditions proches du fonctionnement. Un domaine particulièrement important à développer concerne les techniques à champ proche (AFM, STM, PFM, etc.) qui permettent de sonder la matière à l'échelle nanométrique. Le couplage du champ proche avec des mesures spectroscopiques (SNOM) renforce l'intérêt du chimiste.

Dans le domaine des grands instruments, le rayonnement synchrotron offre d'immenses possibilités nouvelles que les chimistes devront s'approprier. D'une part, l'expérience acquise sur les synchrotrons de troisième génération (ESRF Grenoble, APS Argonne) a ouvert de

nouvelles possibilités de caractérisation statique et dynamique des matériaux (très haute résolution spectrale et spatiale, flux très intense, microfaisceau, diffraction résonante, spectroscopie de corrélation de photons...) et d'autre part, la mise en service de nouveaux synchrotrons européens (Elettra, SOLEIL, Diamond) offre des capacités d'études en forte croissance. La multiplication des lignes de lumière autorisera leur plus grande spécialisation et donc des environnements expérimentaux de plus en plus riches.

L'accès à ces grands instruments ne pouvant être quotidien, la présence et le développement des techniques à l'échelle des laboratoires restent une nécessité majeure pour une conduite efficace des recherches, qu'il s'agisse de techniques de diffusion de rayonnement (tremplin quasiment indispensable pour la préparation des expérimentations synchrotron) ou de toute autre technique complémentaire. Par exemple, la caractérisation des nanoparticules ou des couches minces nécessite des investissements dans les équipements comme la microscopie électronique à transmission de dernière génération et diverses approches basées sur l'interférométrie ou la spectroscopie Raman dans l'UV.

### **Caractérisation de la surface des matériaux**

Les phénomènes interfaciaux prennent une importance prépondérante dans de nombreux phénomènes ou réactions. Il est de plus en plus nécessaire de connaître la composition d'une surface avec des limites de détection de plus en plus basses et une résolution de plus en plus forte (latérale et/ou en profondeur) pour comprendre les phénomènes mis en cause que ce soit dans le domaine de l'adhésion, de la catalyse, de la microélectronique, de la corrosion, des capteurs, de la biocompatibilité. Ceci concerne aussi bien les surfaces monocristallines que les poudres polycristallines (solides divisés et nanocristaux). La compréhension de la réactivité des interfaces et surfaces est un enjeu majeur, c'est elle qui peut déboucher

sur des avancées technologiques basées en grande partie sur de l'ingénierie chimique des interfaces.

Dans le domaine de la chimie des surfaces, les interactions de molécules avec des surfaces de métaux ou de semiconducteurs représentent toujours une grande part des études. Leur connaissance et maîtrise déterminent et détermineront la progression dans de nombreux secteurs fondamentaux et technologiques. Les surfaces d'oxydes ou de polymères sont l'objet d'un nombre croissant de travaux souvent en relation avec leur intérêt technologique potentiel. De plus, une évolution très nette a vu le jour très récemment vers des études de fonctionnalisation de surface et celles d'interfaces entre des biomolécules et des matériaux inorganiques. C'est un champ d'investigation en pleine expansion qu'il faudra coordonner au niveau de l'InC. Enfin l'élaboration in situ de nanostructures représente un domaine extrêmement créatif, qui utilise à la fois la chimie de surface pour des croissances type «bottom-up» fondées sur la réactivité interfaciale, et des techniques de nanostructuration plus «physiques» comme par exemple les techniques de champ proche. Enfin la catalyse hétérogène est le domaine de prédilection pour les développements de caractérisations de surface aussi proches que possible de l'acte catalytique.

Les spectroscopies électroniques de Photoémission (XPS) et ioniques (Tof-SIMS et ISS/LEIS) sont les techniques les plus utilisées en laboratoire pour la caractérisation, respectivement, de la surface et de l'extrême surface des films minces et des matériaux massifs. Ces spectroscopies très complémentaires sont capables de déterminer quantitativement la chimie présente sur les surfaces ou zones d'interfaces par contre cette très grande précision est atteinte au détriment de la résolution latérale de l'analyse. L'imagerie a cependant su prendre sa place même si la résolution latérale est dans le meilleur des cas de l'ordre du micron (dépendant de la méthode d'analyse). La dimension spatiale est néanmoins accessible grâce à la spectroscopie Auger qui permet d'atteindre à présent grâce à l'évolution très sen-

sible de la métrologie des résolutions en imagerie voisines de 10 nm avec une bonne estimation de l'environnement chimique en plus de la détermination de composition chimique. Ces capacités d'analyse en pleine progression font des spectroscopies de photoélectrons ou d'électrons Auger des outils extrêmement puissants qui deviennent indispensables à tout chimiste ou électro-chimiste créateur d'interfaces, films, surfaces fonctionnalisées ou modifiées, etc ; c'est un champ d'expertise qu'il faudra rapidement structurer, de façon analogue à ce qui existe pour d'autres techniques d'analyses chimiques.

Si on a observé ces dernières années un nouvel engouement dans ce domaine, des avancées sont attendues en ce qui concerne la réalisation de caractérisations dans des conditions les plus proches possible de la réalité en évitant l'ultra vide même si fondamentalement on ne pourra jamais réaliser ces études dans les conditions de fonctionnement du matériau considéré. Les procédures, voire les stratégies de transfert sont aussi en pleine évolution ce qui repousse les limites des capacités de diagnostic des spectroscopies nécessitant un environnement UHV. L'approche chimique des surfaces et interfaces devient là prépondérante dans la recherche de l'information réelle. D'autre part et comme dans d'autres domaines la modélisation est devenu un outil indispensable, pour l'interprétation des observables (exemple la modélisation des seuils XPS).

Les techniques d'imagerie en champ proche comme la microscopie à effet tunnel (STM) ou les microscopies à force atomique (AFM), bien que plus récentes que les spectroscopies électroniques et ioniques, permettent maintenant d'obtenir aisément des informations structurales sur tous les types de matériaux (conducteurs ou non), dans des environnements variés (vide, gaz ou liquide) à l'échelle d'investigation nanométrique. Cependant leurs applications quantitatives demeurent limitées aux surfaces modèles.

Les spectroscopies photoniques (IR, Raman, spectroellipsométrie, photoluminescence, etc.), bien que n'étant pas des techniques d'analyse de surface au sens le plus strict, sont

souvent sélectives vis-à-vis de phénomènes de surface. Elles sont d'utilisation plus anciennes et permettent une approche moléculaire de la surface des matériaux qu'elle soit monocristalline ou de poudres divisées avec cependant une résolution spatiale moindre (0,1 micron au mieux). La progression des métrologies repousse en permanence leurs limites respectives. La caractérisation des adsorbats par IR conventionnel est d'utilisation courante mais des méthodologies spécifiques aux surfaces et/ou interfaces (spectroscopie infrarouge en réflexion rasante IRRAS et PM-IRRAS et spectroscopie Raman SERS) ont été développées pour les caractérisations de surfaces modèles. Les corrélations des spectroscopies optiques avec les spectroscopies électroniques deviennent de plus en plus courantes avec par exemple beaucoup de succès dans tout ce qui relève des travaux sur la fonctionnalisation des surfaces.

Il faut particulièrement souligner, qu'en parallèle des approches classiques de laboratoire, l'apport fourni par l'utilisation des grands instruments (notamment le synchrotron) pour les analyses XAS de surface (SEXAFS) mais également pour les techniques d'analyse ci-dessus citées à savoir les techniques de photoémission, photoémission résonante ou encore la microscopie de photoélectrons (X-PEEM), permettant d'accéder à une information chimique de surface avec une meilleure sensibilité (qualitative et quantitative) en raison d'un faisceau excitateur de plus grande énergie, l'infrarouge au rayonnement synchrotron ainsi que la spectroscopie de génération de fréquence somme (SFG) sont également en plein essor pour la caractérisation des phases adsorbées.

Les progrès des techniques d'analyse sensibles à la surface, leur utilisation *in situ*, l'accès aux plates-formes instrumentales, aux grands instruments sont en train de révolutionner l'approche de la réactivité de surface en permettant une caractérisation du matériau dans ses conditions de fonctionnement (Mode Operando). En catalyse hétérogène, en électrochimie interfaciale, etc, l'étude directe de la réactivité de surface dans les conditions opérationnelles en cellules spécifiques est bien établie. Ainsi pour la catalyse hétérogène, l'accès à des études réso-

lues dans le temps permettra de caractériser les étapes élémentaires des réactions de surface, la résolution temporelle étant directement liée à la technique utilisée. Ces études conduiront à la proposition de chemins réactionnels réalistes grâce à l'apport de la modélisation DFT permettant ainsi l'identification des étapes déterminantes. Des développements sont par ailleurs en cours afin de caractériser les intermédiaires réactionnels à très courte durée de vie (spectroscopie pico et femtoseconde).

Si ces caractérisations en mode Operando ne posent pas de problèmes majeurs avec les spectroscopies photoniques il n'en est pas de même pour les spectroscopies électroniques qui requièrent des études sous ultra vide. Des spectromètres XPS environnementaux sont d'ores et déjà proposé commercialement cependant leur performances ne sont pas encore suffisantes pour réellement envisager par exemple des études de catalyse. Par contre un spectromètre de photoémission est en cours d'installation sur la ligne TEMPO de Soleil. Il devrait permettre des études en mode environnemental.

Il faut poursuivre les efforts dans les directions qui confortent l'accès à la chimie des surfaces, les fédérations de moyens devant faire face au coût des appareils d'analyse, tant sur les grands instruments que sur des plateformes de laboratoire (TGE-TGIR...).

D'autre part la France et le CNRS en particulier ont été des précurseurs des études de surfaces modèles, qui ont permis directement ou indirectement des développements dans le contexte appliqué. Ceci s'est fait d'une part par l'apport conceptuel, et, d'autre part, par les outils de caractérisation qu'elles ont générés. Des soutiens spécifiques à ces équipes, des mutualisations d'équipements, sont nécessaires si on désire maintenir cette capacité.

### **3.4 THÉORIE, MODÉLISATION, SIMULATION**

La chimie théorique permet de comprendre, d'interpréter et de prédire et les propriétés

spatiales et temporelles de la matière, via une description atomistique des phénomènes grâce à des modèles mathématiques généralement implantés dans des programmes informatiques. Son degré d'évolution est tel qu'aujourd'hui elle est considérée comme un outil d'analyse incontournable au même titre que d'autres méthodes physico-chimiques, si bien qu'études théoriques et expérimentales sont désormais très souvent associées. Ces dernières années ont vu des avancées considérables alliant des progrès méthodologiques (développements de formalismes, d'algorithmes et de méthodes) avec une meilleure exploitation de calculateurs d'une puissance toujours croissante qui rendent les calculs réalisables à la fois en un temps acceptable et sur des systèmes de tailles et de natures comparables aux systèmes expérimentaux. La chimie théorique, jusque là plutôt dédiée à la modélisation évolue de plus en plus vers la simulation pour représenter le plus possible la complexité des systèmes.

Les défis des prochaines années sont d'inclure toute la chimie et la physique des systèmes dans la modélisation notamment dans ses contributions à la production et au stockage de l'énergie, à l'analyse, à la chimie propre, aux sciences de vie et à la santé. Les verrous sont la difficulté de l'échantillonnage de la complexité structurale dans les systèmes de taille importante (les systèmes biologiques, les systèmes amorphes, les solides et surfaces présentant des défauts, les agrégats et les nanomatériaux, les nouveaux matériaux et les environnements au sens large) afin d'obtenir des grandeurs thermodynamiques et cinétiques pertinentes. L'application des méthodes existantes à des systèmes étendus comportant un grand nombre de minima d'énergie libre locaux reste un défi. De plus, bien que l'on puisse réaliser la simulation au-delà de quelques nanosecondes d'un système de plus d'un million d'atomes, le traitement des assemblages micrométriques et de la complexité du vivant ou des nanomatériaux composites nécessite de passer de l'échelle atomique à des descriptions dites à gros-grains, où chaque grain représente un groupe d'atomes de taille variable. La modélisation gros-grain est aujourd'hui un

domaine en pleine expansion. Un des verrous à lever est la définition de champs de forces effectifs entre grains, réalistes, précis et transférables.

Sur la route vers le macroscopique, il faut noter aussi le développement actuel des simulations mésoscopiques stochastiques (Équation ou Réseaux de Boltzmann, Monte-Carlo cinétique, dynamique brownienne, etc.) permettant de tenir compte de l'effet statistique des fluctuations. Enfin, même dans le domaine macroscopique, dont les équations cinétiques, mécaniques ou hydrodynamiques sont bien établies, se posent aujourd'hui de nouveaux défis comme la description des dispositifs micro/nanofluidiques ou celui du transport ionique dans des milieux complexes comme les argiles, systèmes pour lesquels la structuration microscopique ou mésoscopique sous-jacente est importante.

Pour tenir compte de la complexité croissante des systèmes étudiés, la démarche actuelle est de se placer dans une approche résolument multi-échelle/multi-méthode, que ce soit de façon hybride (couplage entre méthodes) ou hiérarchique (passage d'informations d'un niveau à l'autre).

## **4 – STRUCTURATION ET ENVIRONNEMENT DE LA RECHERCHE EN CHIMIE**

### **4.1 SOURCES DE FINANCEMENT**

La chimie ressent particulièrement la difficulté de financement de ses projets. Il est clair avec le recul que les programmes ANR ne sont pas suffisamment adaptés pour couvrir ses questions importantes, particulièrement aux interfaces. L'augmentation des programmes « blancs » n'a rien changé à ce déficit d'efficacité

qui à moyen terme deviendra dangereux. On peut considérer que le CNRS n'interagit pas suffisamment avec l'ANR pour travailler sur les appels d'offre.

On note aussi l'absence totale de programme national basé sur une véritable évaluation scientifique pour l'acquisition et le renouvellement des équipements mi-lourds (RMN, microscopes cryo-électroniques, microscopes à force atomique, spectrométrie de masse, lasers et imagerie optique, surface) qui met en péril les capacités des laboratoires français à rester compétitifs vis à vis de leurs concurrents étrangers. L'acquisition de ces équipements par les Unités sur la base de montages financiers très étalés dans le temps, sans réelle concertation ni politique d'achat, doit être repensée rapidement : c'est une mission du CNRS !

## 4.2 RELATIONS AVEC L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

On peut aborder ce thème de deux façons différentes : le rôle du CNRS dans l'Enseignement Supérieur d'une part, et le rôle de l'Enseignement Supérieur dans les missions du CNRS d'autre part.

– En ce qui concerne le premier aspect, la participation des unités de Recherche en tant qu'équipes d'accueil au sein des Écoles doctorales devra rester une priorité. Dans ce cadre il sera nécessaire de participer à la lutte contre la désaffection des étudiants pour les filières scientifiques longues, notamment en abordant de manière volontariste le problème de l'emploi et des rémunérations des thésards dans le public comme dans le privé. L'attribution de bourses cofinancées CNRS est un outil efficace d'accompagnement qui devrait être amplifié tout particulièrement dans le secteur de la chimie qui se prête bien à ce type d'opération. Les problèmes d'emploi sont vitaux pour nos jeunes scientifiques, et il doit être clair que des filières longues, difficiles et sans garanties raisonnables d'emplois seront de moins en moins attrayantes, et ce d'autant plus que les efforts

demandés sont eux de plus en plus importants. Les différents Instituts et le CNRS pris dans sa globalité, par la vision nationale qu'ils peuvent revendiquer, ont la capacité de proposition pour créer une politique beaucoup plus attractive dans le domaine du recrutement des scientifiques.

– Dans le second volet, le CNRS doit réaffirmer le rôle des Enseignants-Chercheurs dans la recherche, réfléchir à optimiser leur accompagnement par des actions de délégation encore mieux ciblées. Le problème des horaires d'enseignement, qui ont été grosso modo multipliés par deux au milieu des années 80, devra être abordé avec le ministère, notamment en ce qui concerne les jeunes Maîtres de Conférences présents dans les UMRs. Ces derniers, recrutés sur des critères de recherche assez proches de ceux du CNRS, n'ont plus la possibilité de développer une recherche digne de ce nom lorsqu'ils ont à peine un mi-temps, voire un quart-temps, à consacrer à cette activité. Il doit être clair pour le CNRS qu'il s'agit là d'un gâchis du potentiel de recherche des Unités Associées qui est extrêmement dommageable, dans un contexte de compétitivité élevé. L'expérience montre que la création des chaires «établissement d'enseignement supérieur-CNRS» ne résout pas le problème.

## 4.3 RELATIONS AVEC L'INDUSTRIE

Si la chimie est une science, elle est aussi une industrie : chaque composante scientifique de la discipline a sa correspondante industrielle. Elle a de ce fait un impact très marqué sur la vie économique et sociale. L'industrie chimique joue un rôle stratégique en alimentant directement ou indirectement toutes les autres industries. Il n'est donc pas étonnant que la chimie soit de plus en plus sollicitée pour faire face à divers impératifs socio-économiques nouveaux (ou qui prennent une importance croissante), liés au cours des phénomènes géopolitiques.

En termes de recherche ou de technologie, la chimie est une composante principale de nombreuses industries (pétrole et dérivés, engrais, détergents, cosmétique, alimentaire, emballage, peinture, pharmacie...). Elle intervient dans les industries telles que celles de l'électronique, des télécommunications, de l'automobile, de l'aviation, du retraitement ou de la valorisation des déchets... Il en résulte une implication naturelle de plusieurs pôles de la chimie en milieu industriel. Si ces interactions sont fortes et doivent perdurer dans les domaines de la catalyse et de la pharmacie, la création par le CNRS de laboratoires associés à des entreprises n'a pas encore permis de déboucher sur des applications suffisantes dans les domaines des nano-composants, nanomatériaux et nano-technologies. Le développement de relations partenariales entre des PME et des Unités de l'Institut de Chimie du CNRS est un enjeu pour l'innovation si ces relations vont au-delà de la simple résolution de problèmes ponctuels. Il est clair que le besoin d'interagir avec la recherche fondamentale devient vital pour beaucoup de secteurs industriels. Le CNRS doit considérer cet aspect avec encore plus d'attention que par le passé. Cet enjeu passe par le renforcement des services de Partenariat et de la Valorisation qui doivent interagir plus étroitement avec les Instituts et l'INC tout particulièrement. La mise en place d'une démarche de ces acteurs vers les entreprises est aussi un chantier prioritaire qu'il faut corrélérer avec les actions sur la prise de brevets. Un effort très sensible et pertinent a été fait dans ce domaine, il faut le maintenir. Le

CSD s'interroge sur la pertinence de la nouvelle organisation concernant les brevets qui est mise en place.

## **5 – CONCLUSION**

La chimie est au centre de la Science car elle fournit les éléments de construction étayant des disciplines aussi différentes que la pharmacologie, la génétique, la biochimie, la physique, l'électronique ou les matériaux. Ceci explique les nombreux défis existant aux interfaces avec les sciences de la vie et les sciences de la matière. Connaître les bases de la chimie est donc une nécessité, non seulement comme partie de la culture scientifique mais surtout pour travailler, vivre et progresser dans une société moderne. Le critère essentiel de cette société pour soutenir une science, c'est son potentiel d'innovation et il est clair que les défis ne manquent pas au sein de la discipline Chimie. C'est pourquoi il faudra prendre soin de laisser s'exercer les mécanismes d'acquisition de nouvelles connaissances en chimie fondamentale car les possibilités d'applications découlent de la connaissance en tant qu'élan novateur. En d'autres termes, il faudra toujours préserver un espace de liberté aux chercheurs du cœur de la discipline car c'est de leur créativité que dépendent les futures applications aux interfaces.



## ***Index des auteurs***

---

***Les références renvoient au numéro de page.***

- ABDELMOULA** Mustapha, 243  
**ABEILLÉ** Anne, 635  
**ABGRALL** Rémy, 3  
**ABOU KANDIL** Hisham, 935  
**ABOURACHID** Anick, 527  
**ABRAHAM** Francis, 295  
**ACHER** Francine, 313  
**ADOUI** Lamri, 49  
**AGHION** Philippe, 933  
**ALAIN** Karine, 527  
**ALASTUEY** Angel, 905  
**ALBERA** Dionigi, 773  
**ALBERT** Jean-Pierre, 773  
**ALET** Fabien, 93  
**ALEXANDRE** Anne, 389  
**ALFARO** Stéphane, 377  
**ALLARD** Olivier, 359  
**ALLIX** Olivier, 935  
**ALPHAND** Véronique, 313  
**AMIGUES** Jean-Pierre, 903  
**AMRA** Claude, 935  
**ANDRADE** Philippe, 745  
**ANDRAUD** Marie-Chantal, 231  
**ANDRÉ** Luc, 909  
**ANDRIANTSIMBAZOVINA** Joël, 807  
**ANDRIEU** Joël, 139  
**ANDRIEU-PONEL** Valérie, 389  
**ANGELBERGER** Christian, 187  
**ANGELINI** Annarita, 933  
**ANQUETIN** Sandrine, 377, 909  
**ANSALDI** Mireille, 927  
**ANTOINE** Annie, 621  
**ARBOGAST** Rose-Marie, 571  
**ARDISSON** Janick, 231  
**ARHAN** Michel, 377  
**ARMENGAUD** Émile-Michel, 909  
**ARNOLD** Gérard, 527, 833  
**ARTAUD** Isabelle, 937  
**ASHER** Nicholas, 635  
**ASKENAZY** Philippe, 745  
**ASSFELD** Xavier, 243  
**ASSI** Abdallah, 3  
**ATIENZA** José, 359  
**ATTÉIA** Jean-Luc, 329  
**AUDIN** Liliana, 489  
**AUFFRAY** Jean-Christophe, 903  
**AUJARD** Fabienne, 489, 883  
**AUPIAIS** Jean, 243  
**AURENCHE** Patrick, 33  
**AUSSENAC-GILLES** Nathalie, 833, 859  
**AUVERGNON** Philippe, 727  
**AVERLANT-PETIT** Marie-Christine, 313  
**BAADEN** Marc, 243  
**BABELON** Olivier, 9  
**BABONNEAU** David, 69  
**BABONNEAU** Florence, 937  
**BACHAS** Constantin, 9  
**BACROIX** Brigitte, 935  
**BADER** Marie-France, 445  
**BAFLEUR** Marise, 935  
**BALACHEFF** Nicolas, 833, 859  
**BALCOU** Philippe, 49  
**BALDACCI** Giuseppe, 927  
**BAPTISTE** Philippe, 935  
**BARANES** Edmond, 745  
**BARBAULT** Robert, 903  
**BARBIER-BRYGOO** Hélène, 509  
**BARBIN** Yves, 377  
**BARNIER** Jean-Vianney, 433  
**BARO** Isabelle, 445  
**BAROIS** Philippe, 937  
**BARONE** Vincenzo, 937  
**BARRET** Jean-Marc, 545  
**BARUCH** Marc-Olivier, 621  
**BASCH** Sophie, 653  
**BASSLER** Ursula, 907  
**BASTARD** Benoît, 807  
**BATAILLE** Thierry, 295  
**BAUDA** Pascale, 389  
**BAUDRIN** Emmanuel, 295  
**BAUSSANT** Michèle, 773  
**BEIGBEDER BEAU** Christophe, 33  
**BELAYCHE** Nicole, 603  
**BELOEIL** Jean-Claude, 937  
**BEN TALEB** Ilham, 883  
**BENAS** Philippe, 403, 845

- BENFENATI Fabio, 927  
 BENKIRANE Monsef, 417  
 BENTALEB Ilhem, 377  
 BERGAMINI Jean-François, 243  
 BERGDOLL Marc, 509, 903  
 BERGOUNIOUX Gabriel, 635  
 BERNARD Cécile, 389  
 BERNARD Colette, 635  
 BERNARD Véronique, 9  
 BERNARDO Élizabeth, 9  
 BEROFF-WOHRER Karine, 49  
 BERTANI Philippe, 243  
 BERTHELOT Katell, 603  
 BERTHOME Grégory, 295  
 BERTHOMIEU Dorothée, 265, 937  
 BESSON Mireille, 927  
 BEYSSAC Olivier, 359  
 BEYSSADE Claire, 635  
 BICKEL Thomas, 203  
 BIENAYMÉ Olivier, 329  
 BILBAO Pablo, 791  
 BIMBOT Frédéric, 121  
 BINDER Didier, 571  
 BINGGELI André, 603  
 BIRRIEN Jean-Louis, 927  
 BLANC Christophe, 203  
 BLANC Philippe, 187, 935  
 BLANC Stéphane, 527  
 BLANK Bertram, 907  
 BLANK Ulrich, 433  
 BLASCO Thierry, 403  
 BLOCH Isabelle, 121  
 BLUM Françoise, 621  
 BOCQUET Lydéric, 69  
 BOETIUS Antje, 909  
 BCEUF Jean-Pierre, 187  
 BOHBOT Hervé, 903  
 BÖHM Torsten, 329  
 BOILEAU Michel, 3  
 BOITEUX Serge, 405  
 BOLFAN-CASANOVA Nathalie, 359  
 BOLIGNANO Dominique, 935  
 BOMPAIRE Marc, 603  
 BON François, 571  
 BONFAIT Olivier, 621  
 BONHOMME François, 527  
 BONNAILLIE-NOËL Virginie, 3  
 BONNEAUD Nathalie, 405  
 BONNIOL Jean-Luc, 773  
 BORDES-BENAYOUN Chantal, 773  
 BORDIGONI Marc, 773  
 BORGIS Daniel, 243  
 BORMANS Myriam, 389  
 BORNETTE Gudrun, 389  
 BORSALI Redouane, 203  
 BOSCH-SAVARY Annie, 417  
 BOSCHI-MULLER Sandrine, 403  
 BOSI Stefano, 745  
 BOST Jean-Benoît, 3  
 BOUCART Muriel, 859  
 BOUFFARD Serge, 69  
 BOUFFIER Sophie, 603  
 BOUILLAUD Frédéric, 445  
 BOUJU Jacky, 773  
 BOURGEAT-LAMI Élodie, 203  
 BOURGEOIS Sylvie, 265  
 BOURISSOU Didier, 231  
 BOURLES Yannick, 3  
 BOUVIER Thierry, 389  
 BOUYER Philippe, 49  
 BOUYSSOU Denis, 745  
 BRAINE Jonathan, 329  
 BRASSE David, 907  
 BRÉCHET Thierry, 745  
 BREITKOPF Piotr, 169  
 BRENIER Yann, 3  
 BRENIQUET Catherine, 603  
 BRESEGHELLO Rita-Danielle, 773, 833  
 BRETAGNOLLE Vincent, 527  
 BRETAGNON Thierry, 93  
 BRETHEAU Thierry, 935  
 BRETHERS Daniel, 927  
 BRETON Vincent, 33  
 BRIL Isabelle, 635  
 BRIQUEL Dominique, 933  
 BRU-CHEVALLIER Catherine, 935  
 BRUAND Ary, 909  
 BRUN Christine, 845  
 BRUN Patrice, 603  
 BRUNET Yves, 389  
 BUCHI Éva, 635  
 BUDZINSKI Hélène, 909  
 BUFFENOIR Eric, 905  
 BUHOT DE LAUNAY Marc, 653  
 BURENS-CAROZZA Albane, 571, 933  
 BURNOUF Dominique, 403, 845  
 BUSTARRET Étienne, 93  
 BUTON François, 933  
 CAHEN Michel, 621  
 CALVAYRAC Florent, 69  
 CAMBON Jean-Pierre, 187, 883  
 CAMBRONNE Jean-Pascal, 139  
 CAMMAS Florence, 405  
 CAMOUGRAND Nadine, 417  
 CANARD Bruno, 927  
 CANDEL Sébastien, 935  
 CANITROT Yvan, 545  
 CANTAT Isabelle, 203  
 CAPY Pierre, 527  
 CARCAILLET Christopher, 389, 883  
 CARIOU Marie-Louise, 927  
 CARLOTTI François, 377  
 CARPENTIER Jean-François, 265  
 CARPOUSIS Agamemnon, 405  
 CARRÉ Patrick, 187  
 CARRICABURU Danièle, 727  
 CARRON Gilles, 3  
 CARTIGNY Pierre, 909  
 CASANOVA Michèle, 571  
 CASSIN Barbara, 653  
 CASTEL Philippe, 489  
 CASTELAIN Cathy, 187  
 CASTETS Francis, 433  
 CATTAN Nadine, 791  
 CAZENAVE Christine, 807  
 CERQUIGLINI-TOULET Jacqueline, 653  
 CHABOUSSANT Gregory, 93  
 CHAPLEUR Yves, 937  
 CHARARA Ali, 121  
 CHARDRON Jean-Noël, 121  
 CHARLIER Robert, 169  
 CHAROLLES Michel, 635  
 CHARRIER Jean-Jacques, 935  
 CHARRU François, 187  
 CHARVIS Philippe, 359  
 CHASSENIEUX Christophe, 203  
 CHATENAY Didier, 927

- CHAUD Xavier, 93  
 CHAUMERLIAC Nadine, 909  
 CHAUVEAU Frédéric, 621  
 CHELBI-ALIX Mounira, 417  
 CHEMLA Karine, 621  
 CHENEVIER Gaëtan, 3  
 CHENUIL-MAUREL Chenuil, 527  
 CHEVALLEREAU Christine, 121  
 CHEVRIER Yves, 933  
 CHOPARD-CASADEVALL Claude, 937  
 CHOPIN-NOGUERA Claudine, 93  
 CHRISTENSEN Marianne, 571  
 CHRISTOPHOUL Frédéric, 359  
 CLAUDE Julien, 527  
 CLAVERIE Elisabeth, 773  
 CLAVERIE Gérard, 907  
 CLERBAUX Cathy, 377  
 COLLEYN Jean-Paul, 773  
 COLLOVALD Annie, 727  
 COLOBERT Françoise, 313  
 COMBADIÈRE Christophe, 433  
 COMBARNOUS Yves, 463  
 COMBELLAS Catherine, 243  
 COMBESCURE Monique, 905  
 CONTAMIN Jean-Gabriel, 807  
 CORBLIN Francis, 635, 859  
 CORELLOU Florence, 509  
 CORVAISIER Rudolph, 377  
 COSTA Olivier, 807  
 COTE Francine, 433  
 COTTE Marine, 243  
 COULAUD Henri, 489, 859  
 COURTIEU Jacques, 937  
 COUSINOU Marie-Claude, 33  
 COUSTENIS Athéna, 329  
 COUTARD Olivier, 791, 933  
 COUVERCELLE Jean-Pierre, 265  
 COZZONE Patrick, 935  
 CRAMAIL Henri, 203  
 CRAMER Wolfgang, 903  
 CRASSON Aurele, 653  
 CREMER Jacques, 933  
 CREST Marcel, 445  
 CRISTINI Paul, 169  
 CROIX Dominique, 927  
 CROUAU-ROY Brigitte, 883  
 CROUZET Denis, 621  
 CRUBEZY Éric, 571  
 CRUNELLI Vincenzo, 927  
 CUBY Jean-Gabriel, 329  
**D**'ENTERRIA David, 907  
 DAMAIS Chantal, 545  
 DAMBRINE Gilles, 139, 935  
 DANAILA Luminita, 187  
 DANG Ai-Thu, 745  
 DARD Olivier, 621  
 DATURI Marco, 265  
 DAUPHIN-VILLEMANT Chantal, 463  
 DAUXOIS Thierry, 9  
 DAVID Bruno, 903  
 DAVID Sylvain, 907  
 DAVIDSON Sacha, 9  
 DAVOINE Jacques, 139  
 DAVY Philippe, 909  
 DE ANGELIS Martine, 909  
 DE BOISSIEU Marc, 69  
 DE BREVERN Alexandre, 313, 845  
 DE CONTO Jean-Marie, 33  
 DE COSTER Lilian, 727  
 DE GLAS Michel, 859  
 DE PEINDRAY D'AMBELLE Sophie, 509  
 DE SAINT BLANQUAT Michel, 909  
 DEBAIN Chantal, 527  
 DEFAGO Geneviève, 903  
 DEFFAYET Cédric, 9  
 DEFRANCQ Éric, 313  
 DEGUILHEM Randi, 621, 933  
 DEHAIRS Frank, 909  
 DEL CUETO Carlos, 727  
 DELAHAYE Jean-Pierre, 907  
 DELAITE Christelle, 937  
 DELALANDE Claude, 93  
 DELANDE Dominique, 9  
 DELANNOY Jean-Jacques, 903  
 DELAY Frédéric, 389  
 DELBRACCIO Mireille, 653  
 DELCAYRE Claude, 445  
 DELCROIX Catherine, 727  
 DELMAS Agnès, 313  
 DELMAS Claude, 295  
 DELOULE Étienne, 909  
 DEMADRILLE Renaud, 203  
 DEMAREZ Valérie, 389  
 DEMENEIX Barbara, 445, 927  
 DEMERY LEBRUN Marc, 745  
 DENEFLÉ Sylvette, 791  
 DENISE Alain, 121, 845  
 DEPEAU Sandrine, 791  
 DEPLANO Valérie, 169  
 DERAGON Jean-Marc, 509  
 DERENNE Sylvie, 903  
 DEROIN Bertrand, 3  
 DESCOTES-GÉNON Sébastien, 9  
 DESGROUX Pascale, 187  
 DESPRES Laurence, 527  
 DESTAINVILLE Nicolas, 9, 845  
 DESTOUMIEUX-GARZON Delphine, 313  
 DEVILLE Laurent, 745  
 DEVILLE Michel, 935  
 DI CIACCIO Lucia, 907  
 DI SCALA Georges, 489, 859  
 DIDRY Claude, 727  
 DIEU-NOSJEAN Marie-Caroline, 433  
 DIGNE François, 3  
 DISDIER Christine, 3  
 DJAOUI Stéphane, 231  
 DJURADO Élisabeth, 265  
 DO REGO Didier, 745  
 DOKIC Jérôme, 653  
 DOLBECQ BASTIN Anne, 265  
 DOLLE Pascal, 463  
 DOMBRE Étienne, 121  
 DONARD Olivier, 903  
 DOREAU Hervé, 935  
 DOSSELLI Umberto, 907  
 DOUADY Stéphane, 833  
 DOUAIRE-MARSAUDON Françoise, 933  
 DOUILLET Denis, 49  
 DRAG Cyril, 905  
 DRAMSI Shaynoor, 417  
 DROSSART Pierre, 329, 909  
 DROUET Michel, 69  
 DROUET-MALEWITCH Gilles, 359  
 DUBOIS Jean-Marie, 295  
 DUBOZ Jean-Yves, 905

- DUBREUIL Pascal, 121  
 DUBUS Bertrand, 169, 845  
 DUBUS Guillaume, 329  
 DUCHESNE Sophie, 933  
 DUCREUX-LAKITS Marie-Elizabeth, 621  
 DUFOUR-GERGAM Élisabeth, 139  
 DUGOURD Philippe, 49  
 DUGUET Étienne, 937  
 DUITTOZ Anne, 463  
 DUMARCHEZ Jacques, 907  
 DUMESNIL Karine, 905  
 DUMEZ Hervé, 745  
 DUMUIS Aline, 433  
 DUNÄCH Elisabet, 231  
 DUPRET Baudouin, 727  
 DURAND Bruno, 121  
 DURBEC Pascale, 417  
 DURET Laurent, 405, 845  
 DURRY Georges, 377  
 DUVAL Julien, 727
- EHRENFELD** Francis, 203  
**EISENSTEIN** Odile, 243  
**EL MANSOURI** Abdeslam, 295  
**ELLWANGER** Ulrich, 9  
**EMILIANI** Valentina, 49  
**EMPEREUR** Jean-Yves, 603  
**ENGUEHARD** Chantal, 121, 859  
**ENOCH** Stefan, 935  
**ERMEL** Gwennola, 405  
**ESPAGNE** Michel, 653  
**ESTAQUIER** Jérôme, 417  
**ETCHEBERRY** Arnaud, 937  
**EYCHENE** Alain, 405
- FABRE** Martine, 933  
**FAIRHEAD** Cécile, 405  
**FAJAL** Bruno, 603  
**FAVAREL-GARRIGUES** Gilles, 807  
**FAVIER** Gilles, 265  
**FELBACQ** Didier, 93  
**FERRER** Michèle, 927  
**FIGADÈRE** Bruno, 313  
**FILLIATREAU** Ghislaine, 933  
**FILY** Michel, 377  
**FINES** Francette, 727  
**FLAMANT** Gilles, 187, 935
- FLICHE** Benoît, 773  
**FNIDIKI** Abdeslem, 93  
**FONTAINE** Laurence, 621  
**FONTANEL** Colette, 933  
**FORTIER** Corinne, 773  
**FORVEILLE** Thierry, 329  
**FREGOSI** Franck, 807  
**FRIEDRICH** Rainer, 935  
**FRISON** Gilles, 937
- GAARDHOJE** Jens Jorgen, 907  
**GACHET** Yannick, 417  
**GAGLIARDI** Dominique, 509  
**GAILLE** Marie, 653, 883  
**GALLAIS** Yann, 93  
**GALLAY** Ines, 417, 859  
**GALLET** François, 69  
**GALLITRE** Laurence, 621, 833  
**GALOP** Didier, 571, 883  
**GALTAYRIES** Anouk, 265  
**GAMELIN** Emmanuel, 33  
**GARDIER** Alain, 545  
**GARIBAY** David, 807  
**GARIGLIO** Patrick, 463  
**GARNIER** Josette, 883, 903  
**GASCUEL** Olivier, 845  
**GASPARD** Jean-Pierre, 905  
**GASSIAT** Élisabeth, 3  
**GAUDE** Thierry, 509  
**GAUVAIN** Jean-Luc, 121  
**GAZEAU** Véronique, 603  
**GENEST** Blaise, 121, 845  
**GENOVA** Françoise, 329  
**GENTHON** Christophe, 377  
**GÉRARD** Jean-François, 203  
**GÉRIN** Maryvonne, 329  
**GERVAIS** Pierre, 621  
**GHENDRIH** Philippe, 49  
**GHEZ** Philippe, 907  
**GIARD** Martin, 909  
**GIAVARINI** Laurence, 653  
**GIBERT** Dominique, 359  
**GILBERT** Claude, 903  
**GILLET** Pierre, 545  
**GILLIOT** Pierre, 49  
**GIMEL** Jean-Christophe, 937  
**GIMOND** Clotilde, 405  
**GINGRAS** Yves, 933
- GIOVINAZZO** Jérôme, 33, 907  
**GIRARD** Bertrand, 905  
**GIRAUD** Jean-Pierre, 571  
**GIRAUD** Tatiana, 883  
**GIRERD** Jean-Jacques, 937  
**GIURFA** Martin, 489  
**GODECHOT** Olivier, 727  
**GOFFNER** Deborah, 509  
**GOMEZ** Eléna, 389  
**GOSSNER** Olivier, 745  
**GOUDEAU** Philippe, 69  
**GOUDINEAU** Yves, 773  
**GOUËSET** Vincent, 791  
**GOUET** Patrice, 403  
**GOURIER** Christine, 203  
**GOURMELON** Françoise, 791  
**GOYEAU** Benoît, 187  
**GRALAK** Boris, 935  
**GRANDCOLAS** Philippe, 527  
**GRANGE** Thierry, 405  
**GRANIER DE CASSAGNAC** Raphaël, 33  
**GRASSET** Fabien, 295  
**GRATIAS** Denis, 905  
**GRESSIER** Pascal, 295  
**GRIL** Joseph, 169  
**GRIMALDI** Stéphane, 403  
**GRIMAUD-HERVÉ** Dominique, 571  
**GRISSET** Pascal, 833  
**GROSSETTI** Michel, 727, 833  
**GROSSIORD** Jean-Yves, 33  
**GRUAU** Gérard, 389  
**GUARDASOLE** Alessia, 603  
**GUARI** Yannick, 265  
**GUARINO** Alessio, 69  
**GUAZZELLI** Élisabeth, 187  
**GUERCI** Antonio, 933  
**GUEYE** Lamine, 903  
**GUIHARD-COSTA** Anne-Marie, 571  
**GUILLAUME** Bénédicte, 635  
**GUILLAUME** Christian, 329  
**GUILLAUME** Damien, 359  
**GUILLAUME** François, 243  
**GUILLEMIN** Jean-Claude, 231  
**GUILLO** Dominique, 727  
**GUILLOCHEAU** François, 909  
**GUILLOIN** Jean-Marie, 621

- GUILLOT Stéphane, 359  
 GUILLOU Anne Yvonne, 773  
 GUIONNET Alice, 3  
 GUIOT Joël, 883, 903  
 GUIZARD Christian, 295  
 GULMINELLI Francesca, 33  
 GUYE Maxime, 545  
 GUYOMARC'H Didier, 905
- HAKIM** Vincent, 9, 859  
 HALDENWANG Pierre, 187  
 HALPERIN Jean-Louis, 727  
 HAMEURY Jean-Marie, 909  
 HAPIOT Philippe, 243  
 HARLÉ Virginie, 265  
 HASSAN Fekri, 933  
 HAWAD-CLAUDOT Héléne, 933  
 HAZOTTE Alain, 295  
 HEINZMANN Gerhard, 653  
 HELIOT Laurent, 203  
 HENKEL Malte, 9  
 HENNION Françoise, 903  
 HENNION Marie-Claire, 937  
 HENRION Daniel, 445  
 HENRY Yves, 93  
 HERBIN Raphaèle, 905  
 HERLEM Guillaume, 49  
 HERVÉ DU PENHOAT Catherine, 937  
 HEURTEAUX Catherine, 545  
 HEURTIN Jean-Philippe, 807  
 HILL Vanessa, 329  
 HOFLACK Bernard, 927  
 HOLLINGER Guy, 139  
 HONNORAT Catherine, 807  
 HONORÉ Éric, 445  
 HOSMALIN Anne, 927  
 HOSSAERT Martine, 883  
 HOUDART Sophie, 773  
 HOUDUSSE Anne, 927  
 HOURCADE Jean-Charles, 933  
 HUB-FARIA Isabel, 933  
 HUCHENQ-CHAMPAGNE Anne, 433  
 HUDELLOT Christian, 635  
 HUET Thérèse, 49  
 HUGUET Pascal, 489
- IHL** Olivier, 807  
 IMBERT Christophe, 791  
 IMBERTY Anne, 313  
 INCHAUSPE Geneviève, 927  
 INGRAO Christian, 621  
 INGRIN Jannick, 359
- JABER** Mohamed, 445  
 JACQUIER Claude, 791  
 JARRIAULT Sophie, 463  
 JAUFFRET Philippe, 231  
 JAULIN Christian, 463  
 JEAN-JEAN Olivier, 405  
 JEANDEL Catherine, 909  
 JENATTON Liliane, 909  
 JESSUS Catherine, 463, 927  
 JOCKERS Ralf, 545  
 JOHANNES Ludger, 417  
 JOLY Maryse, 937  
 JONNERY Véronique, 9  
 JONQUIERES Anne, 203  
 JOUAN Denis, 907  
 JOUBERT Marie-France, 295  
 JOUENNE Thierry, 313  
 JOUFFRAIS Christophe, 489, 859  
 JOULAIN Karl, 187  
 JOURNET-DIALLO Odile, 773  
 JULLIAN Jean-Christophe, 313
- KABANA** Sonja, 33  
 KACHIDIAN Philippe, 445  
 KAHN Myrtil, 265  
 KAHN Philippe, 231  
 KAPUSTA Frédéric, 907  
 KAROUÏ Hakim, 231  
 KERLEAU Monique, 745  
 KILLIJIAN Marc-Olivier, 121  
 KLINGER Yann, 909  
 KNEUR Jean-Loïc, 9  
 KNIBIEHLER Martine, 545  
 KOCIAK Mathieu, 905  
 KONDO Djimédo, 169  
 KORGANOW Anne-Sophie, 545  
 KREISEL Jens, 937  
 KRIEF Patricia, 417
- LACAPÈRE** Jean-Jacques, 417  
 LACOMBE Olivier, 359
- LACROIX Claudine, 905  
 LAGABRIELLE Yves, 359  
 LAGACHE Guilaine, 329  
 LAGEAT Yannick, 571  
 LAGRANGE Thierry, 509  
 LAKARD Boris, 265  
 LAMBOLEZ Bertrand, 445  
 LANG Jochen, 417  
 LANGIN Thierry, 509  
 LANSON Bruno, 389  
 LAPCHIN Laurent, 527  
 LARMINAT Florence, 417  
 LARRUE Corinne, 791  
 LAUDE Vincent, 139  
 LAUDET Vincent, 463  
 LAUGIER Pascal, 545  
 LAUNOIS Pascale, 69  
 LAURENT Jean-Paul, 389, 883  
 LE BIDEAU Franck, 265  
 LE BRIS Nadine, 883  
 LE BRUN Odile, 933  
 LE BRUSQ Jacques, 69  
 LE CAER Jean-Pierre, 313  
 LE CROM Jean-Pierre, 933  
 LE HAY Viviane, 807  
 LE MAHO Yvon, 903  
 LE MOGNE Thierry, 169, 935  
 LE RAY Didier, 833  
 LEBON Frédéric, 169  
 LEBRUN Marc-Henri, 509  
 LEBRUN Michel, 509  
 LECOMTE Jane, 833  
 LEDOUX James, 3, 845  
 LEFÈBVRE-SCHUHL Anne, 907  
 LEFRANC Sandrine, 807  
 LEGOUPY Stéphanie, 231  
 LEGRAND Jack, 187  
 LEGRAND Jean-François, 203  
 LEGROS Julien, 231  
 LEGUBE Bernard, 243  
 LEJAY-LEFÈVRE Laurence, 509  
 LEK Sovan, 389, 883  
 LELEU-MERVIEL Sylvie, 833  
 LELIÈVRE Dominique, 313  
 LELLOUCH Emmanuel, 377  
 LEMPÉRIÈRE Annick, 621  
 LÉNA Clément, 445  
 LEONE Philippe, 295

- LERAY Didier, 489  
 LESCOP Christine, 3  
 LESERVOISIER Olivier, 773  
 LESOT Philippe, 231  
 LETURQUE Armelle, 433  
 LEVADE Anne, 727  
 LEVITZ Pierre, 69  
 LEVY Daniel, 403  
 LEVY GARBOUA Louis, 859  
 LHUILLIER Claire, 9  
 LI Yanling, 265  
 LIEVIN Jacques, 937  
 LINDEMANN Thomas, 807  
 LION Michel, 907  
 LIPPENS Guy, 313  
 LIVERA Gabriel, 463  
 LOISEAU Annick, 93, 905  
 LOISON Jean-Christophe, 937  
 LOJOU Élisabeth, 243  
 LOLIVE Jacques, 933  
 LONG Vincent, 49  
 LORAY Frank, 3  
 LORIOU Marc, 807  
 LOUBATON Philippe, 935  
 LOUBOUTIN Catherine, 571  
 LOZANO Jean-Claude, 463  
 LUCAS Bruno, 433  
 LUCIANI Isabelle, 621, 833  
 LUCK Francis, 937  
 LURIN Claire, 509  
 LUYAT Marion, 489, 859  
  
**M**ACCARI Stéphanie, 489  
 MACKAY Robert S., 905  
 MADDALUNO Jacques, 231  
 MADEC Gurvan, 377  
 MAGGIANI Alain, 231  
 MAGILL Peter, 927  
 MAHR Nicole, 389  
 MAIGNAN Antoine, 295  
 MAILLOCHON Isabelle, 489  
 MAILLY Dominique, 93, 905  
 MAISON Christèle, 405  
 MAIJEAN-DUBOIS Sandrine, 883, 903  
 MAMASSIAN Pascal, 489  
 MARC Annie, 187  
 MARCELIN Michel, 909  
  
 MARCHESIELLO Patrick, 377  
 MARENDAZ Christian, 927  
 MARHIC Alain, 377  
 MARION Frédérique, 907  
 MARKOVITSI Dimitra, 243  
 MARQUETTE Arnaud, 243  
 MARQUETTE Gabriel, 909  
 MARRY Catherine, 807  
 MARTIN Nelly, 603  
 MARTIN Olivier, 845  
 MARTIN Thierry, 9  
 MARTIN-JEZEQUEL Véronique, 903  
 MARTINEZ Jean, 231  
 MARTY Bernard, 359  
 MARTY Pascal, 903  
 MATHIOT Daniel, 139  
 MATTEI Antoine, 905  
 MATZKIN Alexandre, 49, 905  
 MAUGÉ Françoise, 937  
 MAUREILLE Bruno, 571  
 MAUREL François, 243  
 MAUREL Nathalie, 169  
 MAURICE Tanguy, 545  
 MAURY Francis, 295  
 MAZAN Sylvie, 463  
 MAZOYER Bernard, 489, 859  
 MAZURE Bertrand, 121  
 MEADEL Cécile, 833  
 MECHTA-GRIGORIOU Fatima, 433  
 MEHL Nadine, 69  
 MEIBOM Anders, 359  
 MELLET Sylvie, 635, 859  
 MELY Yves, 545  
 MENUT Laurent, 377  
 MERCIER Anne, 937  
 MERCIER DE LEPINAY Bernard, 909  
 MERLE Pierre, 727  
 MERVILLE-DECHANET Julie, 433  
 MERZ Stephan, 121  
 MESNARD Jean-Michel, 417  
 MESSNER Francis, 727  
 MÉTIVIER Sophie, 603  
 METZ-LUTZ Marie-Noëlle, 859  
 MEUNIER Christine, 635  
 MICHALON Bénédicte, 791  
  
 MICHALSKI Jean-Claude, 403  
 MICHEL Bénédicte, 405  
 MICHEL Cécile, 603  
 MICHEL Jean-Pierre, 329  
 MICHEL Patrick, 807  
 MICHELET Véronique, 231  
 MIGNANI Gérard, 231  
 MIGNON Valérie, 745  
 MIGUET Serge, 121, 833  
 MIHALCESCU Irina, 845  
 MILLOT Guy, 49  
 MIRAUX Sylvain, 545  
 MIRODATOS Claude, 265  
 MISHAL Zohair, 203  
 MOES Nicolas, 169  
 MOISAN Lionel, 3  
 MONDADA Lorenza, 635  
 MONE Hélène, 927  
 MONNERET Serge, 139  
 MONNIN Christophe, 909  
 MONSEUR Daniele, 635  
 MONTARGÈS-PELLETIER Emmanuelle, 389, 883  
 MORANDEAU Stéphanie, 727  
 MOREAU Marc, 463, 927  
 MOREAU Pierre-François, 653  
 MORETTO Philippe, 907  
 MORIN Céline, 187  
 MORIZOT Jacques, 653  
 MORVAN Gilles, 389, 903  
 MOSSERI Rémy, 905  
 MOTHERWELL William, 937  
 MOTTE Frédérique, 329  
 MOUCHIROUD Dominique, 527  
 MOURARD Denis, 329  
 MOUROT Gilles, 121  
 MOUSCADET Jean-François, 313, 927  
 MOUSIS Olivier, 329  
 MOUSSA Sarga, 653  
 MUS-VETEAU Isabelle, 417  
 MUSCATELLI-BOSSY Françoise, 927  
 MUSSELIN Christine, 807  
  
**N**AKATANI Keitaro, 243  
 NAPOLI Amedeo, 121  
 NEGRIER Emmanuel, 933

- NEHLIG Herrade, 509  
 NEMETH Elisabeth, 933  
 NESPOULOUS Jean-Luc, 933  
 NEVEU André, 905  
 NEYRAT Frédéric, 727  
 NG-BONAVENTURE Kim Heng, 405  
 NGUYEN Noël, 635  
 NGUYEN Van Phu, 745  
 NICOLAS Laurent, 139, 845  
 NICU Liviu, 139  
 NIEDDU Martino, 745  
 NIGOU Jérôme, 313  
 NILGES Michaël, 403  
 NOSELLI Stéphane, 463  
 NOURRY Carine, 745
- O**BRADORS Xavier, 905  
 OLIVE Thierry, 635  
 ORGEAS Laurent, 169  
 ORTLIEB Luc, 883  
 OTZENBERGER Hélène, 489  
 OUAHAB Lahcène, 265  
 OUCHANE Soufian, 509
- P**AGNEUX Vincent, 169  
 PAOLETTI Pierre, 433  
 PASQUIER Claude, 93  
 PASQUIERS Stéphane, 187  
 PATOOR Étienne, 169  
 PAUL Anne, 359  
 PAVON-DJAVID Graciela, 545, 883  
 PAYEN Edmond, 937  
 PAYSSAN Pascal, 329  
 PEAUCELLE Dmitry, 935  
 PÉHAU-ARNAUDET Gérard, 417, 927  
 PEIGNE Stéphane, 527  
 PEIRY Jean-Luc, 571  
 PELLENQ Roland, 69  
 PELLET Claude, 139  
 PENARD Thierry, 745  
 PEREIRA Grégory, 571  
 PEREIRA RAMOS Jean-Pierre, 243  
 PEREZ Éric, 905  
 PERRIO Cécile, 545  
 PERROT Luc, 907
- PERTHAME Benoît, 845  
 PESTEL Joël, 433  
 PETIT Pierre, 545  
 PETROFF Frédéric, 93  
 PEYLIN Philippe, 389  
 PEYRIERAS Nadine, 845  
 PEYROT Vincent, 417  
 PFEFFER Michel, 937  
 PICHON Chantal, 403  
 PICHON Rémy, 909  
 PIERRE Jean-Sébastien, 527  
 PILLER-MICHEL Véronique, 403  
 PINAUD Éric, 433  
 PIQUE Claudine, 417  
 PISSOAT Olivier, 791  
 PITA Santiago, 33  
 PITTAVINO Sandra, 545  
 PLAGNOL Éric, 33  
 PLANEIX Jean-Marc, 265  
 PLANTARD Joël, 905  
 PLATEAU Pierre, 403  
 POCHET Sylvie, 313  
 POLI Rinaldo, 265  
 POLICAR Clotilde, 313  
 POLO DE BEAULIEU Marie Anne, 603  
 POMMIER Jean-Claude, 139  
 POMMIER Sylvie, 169  
 POPOVA Olena, 93  
 POTIN Philippe, 509  
 POULOT Dominique, 621  
 POULOT Monique, 791  
 PRADA Claire, 169  
 PRADIER Thierry, 33  
 PRÉVOST Christophe, 907  
 PREVOT Geoffroy, 69  
 PRIGENT Claude, 463  
 PRIM Damien, 231  
 PRIP-BUUS Carina, 445  
 PROTASSOV Konstantin, 33  
 PUIGDOMENECH ROSELL Pere, 927  
 PUNCH Michael, 907  
 PUY Jean-Yves, 937  
 PY Béatrice, 405
- Q**UEFFELEC-DUMASY Lise, 653  
 QUEYREL François, 603
- QUINTANA-MURCI Lluís, 405  
 QUINTARD Michel, 187
- R**AGUENEAU Olivier, 909  
 RAMBLE Charles, 773  
 RANNO Laurent, 139  
 RASHED Marwan, 653  
 RAUCH Edgar, 169  
 RAWISO Michel, 203  
 RAYNAL Florence, 187  
 RECEVEUR-BRÉCHOT Véronique, 403  
 REGERT Martine, 571  
 RÉGNIER Philippe, 933  
 REHSRINGER Jean-Luc, 295  
 REINING Lucia, 93  
 RENAUD François, 527  
 RENAULT Anne, 69, 905  
 RENDU Christine, 603  
 RENÉ Brigitte, 545  
 REVERDIN Gilles, 909  
 REVET Sandrine, 773  
 REY Anne-Lise, 653  
 REZEAU Laurence, 909  
 RHEIN Catherine, 621  
 RICARD Yanick, 359  
 RICHARD Patrice, 545  
 RICHARD Vanesa, 903  
 RICHARD-VIARD Martine, 49  
 RICETTI Philippe, 203  
 RICOLLEAU Christian, 69  
 RIDEL Melissa, 33  
 RIGOULET Michel, 417  
 RIVANO Hervé, 121  
 RIVET Marie-France, 907  
 ROBAGLIA Christophe, 509  
 ROBERT Jacques, 49  
 ROBERT-PHILIP Isabelle, 49  
 ROBIN Jean-Jacques, 203  
 ROCH Jean-François, 905  
 ROCH Philippe, 927  
 ROCHE Serge, 433  
 RODITCHEV Dimitri, 93  
 ROLLAND Yves, 937  
 ROMBY Pascale, 403  
 RONDA Antoine, 93  
 RONDIREIG Laure, 489  
 RONSSERAY Stéphane, 405

- ROSSO Alberto, 9  
 ROT Gwenaëlle, 807  
 ROUBY Delphine, 359  
 ROUESSAC Vincent, 295  
 ROULLEAU-BERGER Laurence, 807  
 ROUSSEAU Benoit, 187  
 ROUSSEAU Catherine, 405  
 ROUSSEAU Marc, 33  
 ROUSSEL Damien, 445  
 ROUSSET Jean-Pierre, 405  
 ROUSSET Marie-Christine, 121  
 ROUSSET-LAGARDE Marie-Christine, 935  
 ROUVERET Agnès, 603  
 ROUX Michel, 433  
 ROUX Valentine, 571  
 ROY Christelle, 907  
 ROY-DELECLUSE Pascale, 377  
 ROYER Catherine, 937  
 ROYER Pascale, 935  
 ROYET Julien, 463  
 RUAT Martial, 445  
 RUELLAN Étienne, 909  
 RUMEAU Dominique, 509
- SAC-ÉPÉE** Jean-Marc, 3  
 SAGNES Isabelle, 139  
 SAGOT Marie-France, 3  
 SAILLANT Pierre-Yves, 603  
 SALAGER Jean-Louis, 527, 883  
 SALAMERO Jean, 845  
 SALLÉ Marc, 231  
 SALOMON Christophe, 49  
 SALZENSTEIN Patrice, 139  
 SANCHEZ Jean-Louis, 139  
 SANCHEZ-PEREZ José-Miguel, 903  
 SANTANTONIO Paule, 433  
 SANTOS Daniel, 907  
 SAULEAU Ronan, 139  
 SAUVAGEOT Jean-Luc, 905  
 SCHANDELER Jean-Pierre, 653  
 SCHERF Artur, 417  
 SCHERMAN Daniel, 545  
 SCHEVIN Patrick, 527  
 SCHIBLER Patrick, 359  
 SCHMID-ANTOMARCHI Heidy, 545
- SCHMIDT-LAINE Claudine, 903  
 SCHMITT Jean-Louis, 231, 937  
 SCHMITTER Jean-Marie, 313  
 SCHNEIDER Laurent, 933  
 SCHNEIDER-MAUNOURY Sylvie, 463  
 SCHNOEBELEN Philippe, 121  
 SCHOBGENS Pierre-Yves, 935  
 SCHOENTGEN Françoise, 403, 845  
 SCHRODER André, 203  
 SCHUBERT Michael, 433  
 SCHUNE Marie-Hélène, 33  
 SEGUI Yvan, 935  
 SELLEGRY Karine, 377  
 SELLES Patricia, 49  
 SELLIER Anne, 653  
 SELLIER Hermann, 69  
 SEMERIA Marie-Noëlle, 139  
 SÉMERIL David, 265  
 SERRE Laurence, 403  
 SERVAIS Thomas, 359  
 SICARD Marie-Noëlle, 933  
 SIDERA Isabelle, 933  
 SIGAUDD-ROUSSEL Dominique, 445  
 SINOUE Jean-Jacques, 169  
 SIRIGU Angéla, 489  
 SLOMIANNY Marie-Christine, 403, 845  
 SMADJA Joëlle, 791  
 SOUDAN Cécile, 621  
 SOYER Martine, 69  
 SPASSKY Nathalie, 433  
 STAHN Hubert, 745  
 STEHLE Chantal, 909  
 STEPHAN Odile, 69  
 STOJANOVIC Isidora, 653, 859  
 STROPPA Yvan, 745  
 STRUBE Caroline, 445  
 SUSPÈNE Arnaud, 603  
 SYKES Cécile, 203
- TACONNAT** Laurence, 859  
 TAGGIASCO Christian, 9  
 TALLET Bernard, 791  
 TAMBURINI Christian, 377  
 TAMDOGAN Isik, 621
- TAO Charling, 907  
 TARABOUT Gilles, 773  
 TAUC Patrick, 403  
 TEMPLIER Joëlle, 389  
 TENAUD Christian, 935  
 THEBAUD Christophe, 527  
 THIBAUD Jean-Paul, 791  
 THIEBAUD Pierre, 463  
 THIREAU Isabelle, 933  
 THOEMMES Jens, 807  
 THOMAS Philippe, 295  
 THOMAS Pierre, 489  
 THOMAS Yolène, 903  
 THORPE Simon, 489, 859  
 THOUZEAU Gérard, 377, 903  
 TIFFOCHE Christophe, 463, 927  
 TIKHONCHUK Vladimir, 905  
 TOCI René, 405  
 TOPALOV Christian, 933  
 TOURNILHAC François, 203  
 TOUSSAINT Ariane, 927  
 TRAISNEL Jean-Pierre, 791  
 TREDICCE Jorge, 49  
 TRÉZINY Henri, 603  
 TRICOT Anne, 791  
 TRIPON Michel, 33  
 TRIZAC Emmanuel, 9  
 TROUILLET Brice, 791  
 TROUSSON Dominique, 571  
 TSOUKIAS Alexandros, 121, 883  
 TUCKEY Phillip, 329  
 TURQ Alain, 571  
 TURQUE Nathalie, 445  
 TZVETKOV Nikolay, 3
- VAES** Stefaan, 905  
 VAIMAN Daniel, 463  
 VALERO Myriam, 527  
 VALES Frédéric, 169  
 VALIRON Pierre, 909  
 VALLÉE Fabrice, 905  
 VANDEMBROUCQ Damien, 69  
 VANHOVE Martine, 635  
 VANHOVE Pierre, 9  
 VANTARD Marylin, 509  
 VASELLA Andrea, 937  
 VAUCLIN Michel, 909  
 VEDELE Françoise, 509

VELAZQUEZ Matias, 295  
VERCHER Jean-Louis, 489  
VERDIER Claude, 169, 935  
VERGNIOLE Sylvie, 359  
VERMEERSCH Stéphanie, 791  
VERNY Édouard, 727  
VERON Emmanuel, 295  
VIDAL Laurence, 377  
VIGARELLO Georges, 933  
VIGNE Jean-Denis, 933  
VIGNERON Jacky, 265  
VILLERET Vincent, 403  
VILLEVAL Marie-Claire, 745

VILMER Nicole, 329  
VIVIEN Laurent, 139  
VIX Cathie, 295  
VOIRON Christine, 791

**W**AGNER Anne-Catherine, 727  
WALCARIUS Alain, 243  
WALTER Philippe, 403  
WALTZER Lucas, 405  
WATTEZ Julia, 571  
WAUQUIER Sophie, 635  
WEBER Christiane, 883, 903  
WEIL Patrick, 933

WEINMANN Dietmar, 93  
WINSSINGER Nicolas, 313  
WINTER Marc, 33, 907  
WIONET Chantal, 635  
WOLF Pierre-Étienne, 93  
WOLIKOW Serge, 933  
WOLLMAN Francis-André, 927  
WORTHAM Henri, 243

**Z**EMB Thomas, 937  
ZHU Jieping, 231  
ZOMER Fabian, 33  
ZWEIGENBAUM Pierre, 859, 851

## ***Coordination et réalisation***

---

### **COORDINATION SCIENTIFIQUE**

Gilles BOËTSCH

### **COORDINATION TECHNIQUE**

Secrétariat général du Comité national

### **RÉALISATION**

CNRS ÉDITIONS

Centre national de la recherche scientifique  
Secrétariat général du comité national (SGCN)  
3, rue Michel-Ange  
75794 Paris cedex 16