

RAPPORT DE CONJONCTURE

du Comité national de la recherche scientifique

Interdisciplinarité



CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

Sommaire

Préface	V
Introduction	VII
Commission interdisciplinaire 42 – Santé et société	1
Commission interdisciplinaire 43 – Impacts sociaux des nanotechnologies	7
Commission interdisciplinaire 44 – Modélisation des systèmes biologiques, bioinformatique	23
Commission interdisciplinaire 45 – Cognition, langage, traitement de l'information, systèmes naturels et artificiels	31
Commission interdisciplinaire 46 – Risques environnementaux et société	55
Commission interdisciplinaire 47 – Astroparticules	63
Index des auteurs	71

Préface

Avec ses départements et ses instituts, le CNRS couvre l'ensemble des champs scientifiques. Cette spécificité fait de lui le seul organisme français à pouvoir lancer et soutenir des opérations pluridisciplinaires et interdisciplinaires sur une palette très large de thématiques. La pluridisciplinarité, déjà largement mise en œuvre, réunit, autour d'objectifs bien identifiés, des chercheurs de disciplines distinctes qui apportent leurs concepts et leurs méthodes. C'est ainsi que le CNRS peut faire dialoguer concepts et technologies de pointe et traiter de grandes questions de société telles que l'énergie, l'environnement ou la biodiversité.

Mais pour explorer des voies nouvelles, faire émerger des idées et des concepts originaux aux interfaces entre les disciplines, il faut promouvoir des démarches non conventionnelles, innovantes et comportant souvent une part de risque. Il faut faire travailler ensemble des chercheurs d'horizons différents. C'est la finalité déclarée des Commissions Interdisciplinaires (CID) que de favoriser l'émergence de nouveaux champs de recherche à l'intersection de plusieurs compétences disciplinaires. Véritables pépinières, les CID permettent le recrutement et la promotion de chercheurs qui prennent, avec des spécialistes d'autres disciplines, le risque de la construction en commun de nouveaux objets d'études.

Au cours du Colloque du Comité National de la Recherche Scientifique sur l'Interdisciplinarité en 1990, Edgar Morin insistait sur «l'étonnante variété des circonstances qui font progresser les sciences en brisant l'isolement des disciplines», notamment par «l'émergence de nouveaux schèmes cognitifs et de nouvelles hypothèses explicatives», et par la «constitution de conceptions organisatrices qui permettent d'articuler les domaines disciplinaires dans un système théorique commun». Dans le cadre de dynamiques nouvelles, les CID soutiennent, au-delà des interactions entre spécialistes et de l'enrichissement mutuel, un véritable décloisonnement disciplinaire, qui commence à porter ses fruits dans les directions évoquées par Edgar Morin.

Témoin, cette édition du rapport de conjoncture des CID qui met en valeur ces démarches complexes grâce auxquelles le CNRS renouvelle sa capacité à faire avancer le front de la connaissance.

*Élisabeth Giacobino
Chargée de mission pour l'interdisciplinarité
auprès du Directeur général du CNRS*

Introduction

INTERDISCIPLINARITÉ, UNE NÉCESSITÉ OU UNE MODE ?

Le CNRS est tout particulièrement bien armé pour impulser et mener à bien des recherches interdisciplinaires. Une première approche vers l'interdisciplinarité proposée par le groupe de réflexion mis en place par la précédente direction du CNRS (1) a consisté à explorer une frontière entre deux ou plusieurs disciplines en favorisant l'accès à une culture plurielle grâce à des formations adaptées et/ou à des contacts étroits entre chercheurs des différentes disciplines. Cette approche passe par une appropriation collective des concepts et des méthodes, et peut conduire à l'émergence d'une nouvelle discipline grâce à une synergie des apports des deux disciplines de départ. Elle se joue en général sur le moyen ou le long terme. Dans ce qui suit, nous insisterons sur une autre approche qui consiste à répondre à une question complexe d'origine scientifique et/ou sociétale, en mobilisant des spécialistes de plusieurs disciplines qui vont définir et construire ensemble leur programme interdisciplinaire.

1 – L'INTERDISCIPLINARITÉ, UNE NÉCESSITÉ, PAS UNE DIRECTIVE

Au-delà de l'idée que « *l'interdisciplinarité correspond à cette volonté de confronter, d'articuler, voire d'intégrer, pour un objet ou un but commun de recherche* » (2), nous proposons de poser le problème à l'envers, et de ne pas partir d'une volonté « a priori » de construire de l'interdisciplinarité. La mise en œuvre de l'interdisciplinarité devrait correspondre à une réelle nécessité soit scientifique, soit sociétale (3). Ainsi, il ne faudrait en aucun cas forcer l'interdisciplinarité (« *l'orga-*

nisme a pour devoir d'inciter, il ne peut évidemment contraindre » (4)), ne pas faire de la réaction par rapport à de la pro-action qui, elle, est justifiée. Faire « *des ponts internes aux disciplines* » (5) a un intérêt si on doit traverser une rivière et non simplement pour construire un nouveau pont au-dessus de cette rivière. L'interdisciplinarité ne doit donc pas se construire à partir de paradigmes dogmatiques qui peuvent rapidement engendrer des appauvrissements scientifiques.

Mais, si les disciplines constituent des catégories fondamentales du savoir, elles ne peuvent pas toujours répondre aux démarches scientifiques internes, ni encore moins à la demande externe. La particularité des propositions d'interdisciplinarité, c'est de devoir répondre soit à des besoins scientifiques (autour d'un objet), soit à une demande sociétale (autour d'une application). Il s'agit de répondre à une question. Il ne faut faire appel à l'interdisciplinarité que lorsqu'elle est indispensable (« *Le but commun de recherche, le projet, la question scientifique, constituent le point de départ et non la finalité* » (6)). Ainsi, le but de la recherche doit être de faire avancer le front du savoir et de la connaissance et non de viser à accroître le nombre de nouvelles disciplines.

2 – LE CONCEPT D'INTERDISCIPLINARITÉ RÉVISÉ

Le concept d'interdisciplinarité ne saurait se réduire aux sciences de l'environnement, même si, par essence, celles-ci se développent sur des bases interdisciplinaires (7). La création d'un nouveau département « Environnement et Développement Durable » au CNRS a permis de poser les enjeux de l'interdisciplinarité de manière concrète. Avant même de se demander si nous sommes dans un processus de pluri, d'inter ou de transdisciplinarité, il convient de revenir à la définition même du concept d'interdisciplinarité avec des exemples concrets et quelques propositions préliminaires.

2.1 MISE EN ŒUVRE DU CONCEPT D'INTERDISCIPLINARITÉ

La mise en œuvre du concept d'interdisciplinarité ne s'exprime pas nécessairement par la vision lamarckienne d'une évolution séquencée *pluridisciplinarité-interdisciplinarité-transdisciplinarité* (8). Aussi, il convient d'insister sur le fait que la mise en œuvre du concept d'interdisciplinarité ne doit pas être strictement politique et ne pas constituer un instrument de contrôle du pouvoir. Le passage « obligatoire » de pluri à inter et enfin à transdisciplinarité sur une échelle de 20 ans est une vision étatiste des choses, comme s'il fallait nécessairement viser la transdisciplinarité. Ce modèle devrait être revisité pour éviter l'échec.

En fait, l'interdisciplinarité se pose en opposition à la pluridisciplinarité, et c'est là où se situent les véritables enjeux. L'interdisciplinarité s'inscrit dans une volonté commune de collaboration et de confrontation de concepts et de méthodes dès la conception de chaque projet scientifique. Il s'agit de répondre à une question scientifique commune ou partagée, pas de servir de vernis à un programme construit par quelques spécialistes d'une unique discipline. C'est ensemble que les chercheurs issus des différentes disciplines doivent définir et construire leur programme interdisciplinaire. De ce fait, l'interdisciplinarité ne correspond et ne doit correspondre en aucun cas à un programme interdépartemental. Pour contrer une vision réductrice et linéaire de la démarche scientifique, il convient d'éviter de généraliser la distinction inter/pluri/transdisciplinarité qui ne

peut fonctionner en réalité que dans des cas assez rares (comme, par exemple, la physico-chimie ou les sciences de l'environnement) mais plutôt tendre vers la notion de couplage disciplinaire faible ou fort.

2.2 2.2 LES BESOINS DÉCLENCHENT L'INTERDISCIPLINARITÉ – QUELQUES EXEMPLES CONCRETS

Il convient donc être pragmatique et de démontrer à quel point des besoins réels vont appeler tout naturellement à l'interdisciplinarité. L'interdisciplinarité au CNRS peut être développée à partir d'objets de recherche bien identifiés et surtout qui soient susceptibles de réunir des chercheurs venus d'horizons variés. L'interdisciplinarité est, avant toute chose, la recherche d'une expertise collective exercée par les compétences nécessaires réunies pour aborder un problème complexe, ce que l'on pourrait appeler une question scientifique multiple (9). Plusieurs exemples éloquents de besoins ayant déclenchés des projets interdisciplinaires peuvent être proposés :

– La psycho-acoustique est un bon modèle de fonctionnement de l'interdisciplinarité bien que couvrant un champ de recherche très spécialisé. Elle est à la frontière de trois disciplines de trois champs distincts, l'acoustique pour les sciences « dures », la physiologie pour les sciences du vivant et la psychologie pour les sciences humaines.

– Le SIDA, constituant un réel problème à la fois sociétal et médical, a bénéficié d'une avance considérable grâce à une pratique de l'interdisciplinarité née sur les recherches réunissant des disciplines très variées (virologie, épidémiologie, sociologie, anthropologie).

– « Les villes à l'heure des changements climatiques » constitue un thème de recherche faisant intervenir l'interdisciplinarité et non pas un programme intitulé « Environnement et villes », dont le titre vague ne pose pas de vraie question scientifique.

2.3 LE VOLONTARISME PLURIDISCIPLINAIRE

On ne décrète donc pas l'interdisciplinarité. Nous insistons sur cette notion de couplage faible ou fort, lié à la résolution d'une question scientifique, qui peut être ponctuelle, et pas nécessairement mener à l'interdisciplinarité, et encore moins à la transdisciplinarité. C'est pourquoi, parler de problématiques, d'objets de recherche interdisciplinaires paraît plus exact que parler d'interdisciplinarité. Certains concepts pourtant a priori transversaux, comme, par exemple, celui de santé environnementale, ne font pas forcément appel à l'interdisciplinarité. L'interdisciplinarité correspond donc bien à la réunion voire au mariage de disciplines sur un projet. L'interdisciplinarité n'est pas définie/dirigée/obligée, il s'agit bien de répondre collectivement à une question scientifique et non de bricoler quelques éléments disparates pour aller dans le sens de la mode du temps. Ce partage ne devrait pas être dirigé par l'un ou l'autre des acteurs en présence. Un projet interdisciplinaire doit émerger à partir d'un mode collégial de fonctionnement, être le fruit d'une vision commune ou tout du moins partagée, de façon consensuelle. Il s'agit de se confronter collectivement à un problème. En aucun cas l'interdisciplinarité ne pourra être une réussite si elle se fait avec des matelots qui besognent à la pluridisciplinarité et un capitaine prétendant « orchestrer » l'interdisciplinarité.

L'interdisciplinarité est intimement liée à ce qu'Edgar Morin appelle la « complexité » (10) d'une question. Les questions scientifiques portant sur des problèmes suffisamment complexes nécessitent une réflexion interdisciplinaire (11), comme, par exemple, le problème sociétal des banlieues françaises. Sur le plan de la formation à la recherche, à côté d'un enseignement disciplinaire classique, l'interdisciplinarité doit aussi se préparer en tant que culture scientifique dès le Master recherche.

3 – LE CNRS, CREUSET UNIQUE POUR RÉALISER L'INTERDISCIPLINARITÉ

La France possède une structure de recherche remarquable qui se nomme le CNRS et qui peut, à un niveau national et international, influencer les dynamiques de recherche. Cette structure est par essence pluridisciplinaire et peut donc être visionnaire au niveau de l'interdisciplinarité. Il s'agit dans la pratique quotidienne du scientifique de mettre en place, à partir d'un objet, un projet commun de recherche, mais seulement si c'est nécessaire. Le rôle du CNRS n'est pas de faire de l'idéologie sur ce sujet. Il doit contribuer à accroître le savoir, même si celui-ci est très disciplinaire et/ou hyper spécialisé, car sa finalité n'est pas de faire émerger de nouvelles sciences mais de faire émerger de nouveaux savoirs. Notre rôle est donc de documenter le pourquoi de l'interdisciplinarité dans un domaine précis.

Le développement d'une culture de projet devrait être un des principaux points de départ et un justificatif de poids du besoin d'interdisciplinarité. Le Programme MOUSSON est un bon exemple d'interdisciplinarité et sa puissance de réflexion est à prendre en compte. Ainsi, il s'agit de ne pas faire de prosélytisme, mais d'identifier en priorité les champs émergents. Ceci permettra à la recherche française d'éviter de piétiner et de continuer d'être compétitive sur la scène internationale. Cette reconnaissance passe par une action fédérative des disciplines, ce qui constitue une règle à suivre. Si le thème « Ville et mobilité durable » est revendiqué comme un problème majeur, mettons-nous ensemble pour l'aborder! N'oublions enfin jamais l'urgence qu'il y a à faire de vrais bilans et surtout une véritable évaluation de ces projets interdisciplinaires.

*Groupe de travail « Interdisciplinarité »
du Conseil scientifique du CNRS
Pierre Alart, Gilles Boëtsch, Franco Brezzi,
Christian Gorini, Marc Lucotte et Daniel Mansuy.*

Notes

(1) Le Quéau D. *et al.*, *Promouvoir l'interdisciplinarité au CNRS*, Paris, CNRS, 2005.

(2) *Ibid.*

(3) *Facilitating Interdisciplinary Research*, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering and Institute of Medicine of the National Academies, Washington DC, The National Academies Press, 2005.

(4) Le Quéau D. *et al.*, *op. cit.*

(5) *Ibid.*

(6) *Ibid.*

(7) *Grand Challenges in Environmental Sciences*, National Research Council (NRC), Report from the Committee on Grand Challenges in Environmental Sciences, Washington, DC, National Academy Press, 2001.

(8) Le Quéau D. *et al.*, *op. cit.*

(9) Morin E. *L'intelligence de la complexité*, Paris, L'Harmattan, 1999.

(10) *Ibid.*

(11) *Complex Environmental Systems: Synthesis for Earth, Life and Society in the 21st Century*, Report from the Advisory Committee for Environmental Research and Education, Arlington, VA: National Science Foundation, 2005.

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 42

SANTÉ ET SOCIÉTÉ

Président de la CID

Jean-Paul MOATTI

Membres de la CID

Jean-Paul AURAY

Simone BATEMAN-NOVAES

Christelle BAUNEZ

Manuel BOUVARD

Martine BUNGENER

Martine CADOR

Claude CASELLAS

Franck CHAILLAN

Benoît DERVAUX

Olivier DUTOUR

Farid EL MASSIOUI

Philippe ENCLOS

Laurent FASANO

Christian GROSS

Yves LÉVI

Jacques MILLET

Christophe TIFFOCHE

INTRODUCTION

Au cours des dix dernières années, **les Sciences Humaines, Économiques et Sociales appliquées à la santé (SHES-S)** ont connu, au plan international, un développement rapide. Certaines tendent (notamment anthropologie de la santé, économie de la santé, psychologie et psychosociologie de la santé, sociologie de la santé) à se constituer en champ disciplinaire à proprement parler, doté d'une autonomie relative forte par rapport à leur discipline de référence, avec ses sociétés savantes internationales, ses Congrès internationaux (qui rassemblent des milliers de participants) et ses revues spécialisées dont certaines atteignent des Impact Factors significatifs (1). Dans d'autres disciplines de SHES, il existe des créneaux de développement bien établis et structurés pour les applications à la santé et à la médecine (droit et santé, sociologie des sciences appliquées à la biomédecine, histoire de la médecine, sociologie politique de la protection sociale, etc.). Par ailleurs, on constate une montée en puissance des publications de SHES dans les meilleures revues biomédicales.

Ce dynamisme s'alimente d'abord de celui des différents champs scientifiques concernés mais tout autant de l'importance des enjeux économiques, culturels et sociaux

liés à la santé que les SHES peuvent contribuer à éclairer :

– le poids croissant des **intérêts économiques liés à l'industrie pharmaceutique et biotechnologique**, qui demeure le secteur le plus profitable au plan international, avec la branche des assurances, en dépit du ralentissement régulier du nombre de molécules nouvelles mises sur le marché ainsi que de leur degré d'innovation (2) ;

– la place de plus en plus centrale que **la « culture du risque »** tend à occuper **dans la vie quotidienne** des sociétés contemporaines (3) ;

– la mise sur l'agenda politique d'un nombre croissant **d'enjeux de sécurité sanitaire** et les crises de santé publique qui leur sont souvent associés (4) ;

– l'internalisation croissante, dans les pratiques de soins et dans l'organisation des systèmes de santé, des **contraintes de maîtrise de la croissance des dépenses de santé** ;

– **la tendance à la « chronicisation » du risque maladie** sous les effets du vieillissement démographique, de la prévalence croissante des maladies chroniques et des handicaps associées à l'âge, ainsi que, simplement, des avancées de la science biologique et du progrès médical ;

– la montée en puissance du **« consumérisme » en matière de santé**, liée à l'élévation des niveaux d'éducation et d'accès aux technologies de l'information des populations, qui peut alimenter à la fois les mouvements sociaux de patients et leur revendication d'un plus grand partage de l'information et de la décision médicales, l'intégration dans les politiques publiques de la lutte contre les inégalités d'accès aux soins et d'états de santé (5) comme l'extension des créneaux de marché relevant du champ sanitaire.

CONJONCTURE NATIONALE

L'un des avantages comparatifs, au plan international, des premiers travaux français en SHES-S dans les années 1960/80, dont la ligne dominante se référait au concept de socio-économie de la santé, était justement d'avoir affirmé une telle démarche doublement interdisciplinaire. Celle-ci a favorisé, dans le champ de la santé, une confrontation plus poussée entre les différentes SHES que dans la plupart des autres champs appliqués, et elle a permis d'attirer l'attention sur plusieurs spécificités des problèmes et systèmes de santé, dont les paradigmes dominants dans ces disciplines ne permettaient pas de bien rendre compte. Cette dynamique initiale a néanmoins fini par s'épuiser car elle a entretenu une certaine déconnexion des recherches françaises en SHES de la santé par rapport aux recherches internationales du domaine (et du coup une sous-représentation dans les publications scientifiques internationales) ainsi que par rapport aux « avancées » théoriques les plus récentes en SHES (6). Il en a découlé, au cours des dix dernières années, de façon variable mais convergente selon les domaines, une tendance de plus en plus marquée des chercheurs à s'efforcer à un retour vers les « fondamentaux » des disciplines de SHES. Outre l'amélioration de la qualité et de la quantité des publications qui ont accompagné ce mouvement, cette démarche s'est, là encore, révélée fructueuse à de nombreux titres dont on ne peut bien sûr pas faire ici la liste exhaustive.

À titre d'exemples, les recherches en économie de la santé inspirées de la théorie de l'agence et des contrats ont révélé les limites des politiques de maîtrise des dépenses prioritairement fondées, comme en France, sur le contrôle malthusien de l'offre, et renouvelé l'approche des spécificités de la relation médecin/patient qui tendent à rendre inopérantes les solutions classiquement proposées aux problèmes d'asymétries d'information dans le cadre des marchés (7). Toujours en économie de la santé, la mise en relation des travaux d'évaluation économique de stratégies médi-

cales avec le cadre de référence de l'économie du bien-être (welfare economics) et de l'analyse coût-bénéfice (8) permettent de lever les nombreuses ambiguïtés méthodologiques qui avaient pu présider à l'introduction du calcul économique dans ce domaine (9). De même, les références à la sociologie des professions et à la sociologie des organisations ont apporté un éclairage indispensable à la compréhension des mécanismes de régulation des systèmes de santé et d'évolution de l'hôpital moderne, comme la théorie des représentations en psychologie sociale à celle des discordances maintes fois constatées entre attitudes et croyances d'une part, comportements effectifs de santé d'autre part. L'approche anthropologique, quant à elle, a étendu son champ de préoccupations aux pratiques et représentations des personnels de santé et au fonctionnement des structures de soins, privilégiant désormais l'analyse de la rencontre (et souvent de la confrontation) des « agendas » respectifs des patients, de leur entourage, des soignants et des acteurs institutionnels, nationaux comme internationaux, de la santé. En droit, en histoire, et en philosophie (entre autres autour des réflexions soulevées par la bioéthique), des champs spécialisés sur les enjeux de santé ont émergé de façon significative.

Au plan pratique, comme l'ont révélé les concours chercheurs de la CID 42 en 2005/2006, il existe désormais un important **vivier de jeunes post-doctorants et chercheurs dans la plupart des disciplines de SHES qui se spécialisent en santé** et qui peinent à trouver des débouchés statutaires leur permettant de pérenniser leur investissement dans ce champ.

Cette évolution des dix dernières années a pu cependant entretenir une certaine insuffisance de rapprochement entre des équipes (et des chercheurs) de SHES-S mettant à profit leurs liens avec les disciplines biomédicales (au travers notamment de l'INSERM ou de certains départements de santé publique des UFR de Médecine), et d'autres équipes (notamment CNRS) demeurant rattachées à des laboratoires « généralistes » de SHES et éprouvant certaines

difficultés à pénétrer en profondeur et de façon pérenne le terrain de la santé. Comme au plan international, elle alimente désormais un **risque d'autonomisation excessive des sous-champs de recherche en SHES de la santé** qui pourrait conduire à sacrifier la pertinence (scientifique et concrète) des recherches à un souci de pure sophistication méthodologique « en soi » (10). Tout en maintenant l'enracinement fort dans chacune des disciplines de référence, il faut aujourd'hui **renouer avec les acquis d'interdisciplinarité** qui caractérisaient les débuts des SHES-S, en particulier dans notre pays.

S'inscrivant dans la continuité du programme interdisciplinaire « Sciences Biomédicales, Santé et Société », la création de la **CID 42 Santé & Société du CNRS** constitue une innovation stratégique majeure, qui va au-delà de l'organisme lui-même, dans la mesure où, pour l'instant et pour la première fois en France, elle constitue le seul lieu institutionnel qui rend possible une double interdisciplinarité : entre les équipes SHES spécialisées en santé et celles qui demeurent « généralistes » d'une part, entre les SHES et les sciences de la vie d'autre part. Sauf à envisager une généralisation de cette double démarche (dans le cadre de l'AER?) par la mise en place d'une instance analogue mais commune à l'ensemble des EPST concernés (CNRS, INSERM, IRD, INRA, etc.), sa poursuite paraît d'autant plus cruciale que la conjoncture internationale, théorique et pratique, des SHES-S met à l'ordre du jour la relance d'une nouvelle interdisciplinarité.

S'agissant des thématiques qui permettent la mise en œuvre de cette nouvelle interdisciplinarité, elles peuvent être regroupées autour de deux axes :

1. Déchiffrer les interventions sur le vivant, analyser la genèse et l'impact sur la société des innovations biomédicales :

- les progrès de la biomédecine et des applications biotechnologiques qui lui sont liées contribuent à modifier en profondeur les représentations du vivant, les pratiques professionnelles et de recherches concernées et, plus

largement, les rapports entre sciences biomédicales, médecine et sociétés. Ces progrès affectent les définitions mêmes de la personne humaine et les grandes catégories anthropologiques des différentes cultures (vie, genre, filiation, douleur, mort, etc.). Ils bousculent certaines dimensions fondatrices du fonctionnement économique et de l'ordre social ;

– les SHES ont un rôle important à jouer pour déchiffrer les modalités par lesquelles l'ensemble des technologies nouvelles (tant biomédicales que d'information et de communication), tendent à modifier les rapports à la subjectivité et à l'identité, les conceptions de soi et du corps comme des mécanismes essentiels de la régulation économique et sociale (systèmes d'assurance maladie, etc.). Au plan social, certaines de ces possibilités techniques interviennent directement sur les frontières entre des catégories que l'on pouvait jusque là considérer comme intangibles : frontières entre la vie et la mort (réanimation assistée, soins palliatifs) ; de la parenté (fécondation in vitro, clonage) ; entre le normal et le pathologique (vieillesse, dépression) ; entre l'homme et l'animal (xénogreffes) ; entre ce qui relève du marché et du secteur public ou solidaire. Souvent porteuse d'amélioration de l'état de santé, l'accessibilité à ces nouvelles technologies peut néanmoins induire de nouvelles formes d'inégalités et de discriminations entre différents groupes sociaux, entre pays riches et pays pauvres, et implique e toute façon des arbitrages complexes entre impératifs de santé publique, efficacité économique et justice sociale (accès aux médicaments dans les PED, brevetabilité des gènes, etc.).

2. Saisir les nouvelles formes de la « médicalisation », et leur impact sur les groupes et solidarités sociales :

– les limites de ce qui constitue les domaines privilégiés de la prise en charge par la

médecine ont toujours répondu à la fois à une logique scientifique et à une logique sociale. Ces limites se déplacent aujourd'hui rapidement sous la pression conjuguée des progrès de la biomédecine (en particulier en génétique et en imagerie) d'une part, des mutations socio-économiques qui affectent la stabilité de l'emploi ainsi que les systèmes de redistribution et de protection sociales. Cette double pression est exacerbée par le vieillissement démographique, et l'augmentation du nombre des personnes vivant avec une maladie ou/et un handicap chronique (ou contraintes de suivre des traitements médicaux à vie ou de longue durée) ;

– au-delà de la diversité des groupes concernés (personnes âgées, accidentées de la vie ou handicapées de naissance, personnes à risque génétique ou comportemental de pathologies lourdes, etc.), les SHES doivent contribuer aux débats, en renouvellement permanent, sur la définition des notions de normalité et de thérapeutique ainsi que sur les formes d'intervention sanitaire et les types de politiques publiques censées répondre aux besoins de ces personnes. Comme le confirme la mise en place par l'OMS d'une Grande Commission sur les « Déterminants Sociaux de la Santé », faisant suite à un exercice similaire sur « Macroéconomie & Santé », la question de la persistance d'inégalités sociales face à la santé et à l'accès aux soins demeure centrale. Les SHES, en interdisciplinarité avec les sciences de la vie, sont essentielles pour mieux comprendre les chaînes causales complexes qui conduisent à ces inégalités qui ne se limitent pas aux effets directs des déterminants socio-économiques de base. Enfin, les transformations des relations entre les professionnels de santé et les patients qu'ils prennent en charge sont à la croisée d'évolutions multiples que les SHES peuvent, mieux que toutes autres disciplines, contribuer à décoder.

Notes

- (1) Par exemple, *Journal of Health Economics*, *Social Science & Medicine*, *Health Affairs*, *Milbank Quarterly*, *Health Psychology*, *American Journal of Public Health*, *Annals of Behavioral Medicine* ont des IF compris entre 2,5 et 3,5.
- (2) Angell M. *The truth about drug companies*. Random House, New-York, 2004.
- (3) Beck U. *Risk Society, Towards a New Modernity*. Sage Publication, London, 1992.
Giddens A. *Modernity and Self-Identity*. Stanford University Press, Los Angeles, 1991.
Peretti-Watel P. *Sociologie du risque*. Armand Colin, Paris, 2000.
- (4) Noiville C. *Du bon gouvernement des risques*. PUF, Paris, 2003.
Setbon M., Raude J., Fischler C., Flahault A. *Risk perception of the «mad cow disease» in France: determinants and consequences*. *Risk Analysis*, 25, 2005, Pages 813-826.
Bagayoko-Penone N., Hours B. (Eds.) *Etats, ONG et production des normes sécuritaires dans les pays du sud*, Paris, L'Harmattan, 2005.
- (5) Renault E. *L'expérience de l'injustice. Reconnaissance et clinique de l'injustice*. La Découverte, Paris, 2004.
- (6) Pour l'économie de la santé, voir : Benamouzig, D. *La santé au miroir de l'économie*. PUF, Paris, 2005.
Pour la psychologie de la santé, voir : Morin, M. *Parcours de Santé*, Armand Colin, Paris, 2004.
- (7) Rochaix L. Asymétries d'information et incertitude en santé : les apports de la théorie des contrats. *Economie & Prévision* 1997, 129-130 : 11-24.
- (8) Drèze N., Stern N. The theory of cost-benefit analysis. *Handbook of Public Economics*, Vol. II,, North Holland, Amsterdam, Pages 909-986, 1987.
- (9) Carrère M.O. Préface. In Drummond M.F. et al. *Méthodes d'évaluation économique des programmes de santé*. *Economica*, trad. fr., Paris, 1998.
- (10) Par exemple, lorsque les conférences du Health Economics Study Group britannique présentent des dizaines de communications sur les méthodologies de révélation des préférences face à des choix de santé tout en négligeant totalement des sujets comme ceux de la propriété industrielle et de l'innovation pharmaceutique ou de l'organisation hospitalière.

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 43

IMPACTS SOCIAUX DES NANOTECHNOLOGIES

Président de la CID
Dominique VINCK

Membres de la CID
Aline AUROUX
Pierre BEAUVILLAIN
Gilles BERTRAND
Patrick BOISSEAU
Dominique BOULLIER
Jean-Pierre DJUKIC
Jean-Marc DOUILLARD
Hugues DREYSSE
Marc DRILLON
Giancarlo FAINI
François GUILLEN
Gérard HELARY
Philippe LAREDO
Louis LAURENT
Patrick SCHMOLL
André TOUBOUL
André VIoux

L'émergence des nanosciences et des nanotechnologies amorce des transformations du paysage scientifique et industriel. Chercheurs, décideurs publics et privés, auteurs de science-fiction comme opposants entrent en scène, provoquant un bouleversement de l'industrie et des modes de vie. En France comme à l'étranger, le débat public comme les travaux des chercheurs en sciences sociales viennent à identifier une série de questions majeures pour la société en termes de régulation des dynamiques scientifiques, technologiques et économiques. Ces régulations concernent l'évaluation, la maîtrise des risques, l'intégration des nouvelles technologies comme la définition de priorités sociétales.

Le phénomène est également accompagné d'exagérations (*hype*) en termes de fabuleuses promesses liées à ces nouvelles connaissances et technologies ainsi que de craintes corrélatives suscitées par ces exagérations. Craintes et exagérations sont autant le fait de scientifiques, d'institutions, de romanciers, d'entreprises que de mouvements politiques ou citoyens. Si leurs fondements sont généralement sapés par les experts, qui tendent à minimiser les uns comme les autres, elles suscitent néanmoins des réactions sociales, politiques et économiques (par exemple, en termes de comportement d'achat) qui génèrent, à leur tour, des peurs de la part des investisseurs industriels, des décideurs politiques et des institutions de recherche.

Depuis les années 2000, s'expriment une série de réactions et des mouvements d'opposition, y compris des boycotts et des déplacements de préférences économiques. Le phénomène n'est certainement pas passager ; tout indique qu'il sera constitutif, dans la durée, de la dynamique socio-scientifique, technique et industrielle des nanosciences et nanotechnologies.

Diverses institutions ont déjà réagi en rassemblant des experts et des commissions et en produisant des rapports sur les risques, l'évaluation et la mise en forme des technologies : OPECST, DG santé et consommateur, assureurs de Suisse, nanoforum, Académie des sciences, Royal Society et Royal Academy of Engineering (1), NSF, etc. La reconnaissance internationale du besoin de se pencher sur les questions liées à la santé, à l'environnement, à l'économie et à la société ne fait nul doute. Les principaux plans de développement des nanotechnologies dans le monde prévoient explicitement d'intégrer ces questions dans les programmes de recherche à promouvoir, par exemple, le Plan stratégique développé par le National Science and Technology Council des Etats-Unis (NNI) (2) ou le Plan pour l'Europe 2005-2009 de la Commission européenne (3). Les institutions initient aussi diverses formes de dialogue science – société (voir par exemple ce qui est réalisé dans le cadre du réseau EPTA (4)).

Par ailleurs, des équipes, des réseaux et des programmes de recherche (en sciences sociales, toxicologie, métrologie, etc.) commencent à se structurer sur le plan international (pays anglo-saxon et Nord de l'Europe). Les chercheurs sont également convoqués pour alimenter l'aide à la décision, l'évaluation constructive des choix technologiques (*constructive technology assessment* aux Pays-Bas), le débat et la mise en place d'un système de régulation planétaire (par exemple, le Bureau consultatif international pour une nanoscience responsable).

Les enjeux sociétaux sont manifestement de grande ampleur tant sur le plan économique que politique. Ils sont liés aux besoins de légitimer les choix technologiques et industriels, voire d'en débattre, de normaliser les produits, les technologies et les instruments

de mesure, d'harmoniser les moyens d'action ainsi que de limiter les usages là où le comportement du produit est imprévisible et potentiellement dangereux. Il s'agit aussi d'informer, de prévenir, de surveiller et d'alerter, de légaliser, de réguler (régulation économique, politique, sociétale, éthique) pour protéger les marchés, les consommateurs et les citoyens. Il en va du contrôle par la société des dynamiques socio-économiques qui s'engagent. La question se pose de savoir comment les gouvernements et les institutions pourront traiter les impacts socio-économiques, environnementaux et sanitaires sans décourager l'exploration des perspectives bénéfiques.

1 – LA QUESTION DES « IMPACTS SOCIAUX » DES « NANOTECHNOLOGIES »

La CID 43 « Impacts sociétaux des nanotechnologies » est supposée contribuer à la constitution d'un milieu de recherche en mesure de traiter avec rigueur les questions sociétales nouvelles liées aux nanosciences et nanotechnologies et à produire la connaissance de base utile à la réflexion collective et à la prise de décision. Dans ce contexte, la faiblesse numérique de la recherche française en toxicologie, en épidémiologie et en sciences sociales dans le domaine est remarquable. En explicitant sa vision des enjeux de la recherche dans le domaine, la CID 43 entend contribuer au renforcement d'un tel milieu de recherche.

1.1 « IMPACT » ?

La CID 43 est intitulée « Impacts sociétaux des nanotechnologies ». Toutefois la notion d'*impact* est problématique. Elle est critiquée depuis longtemps dans les sciences sociales parce qu'elle laisse entendre que les change-

ments observés seraient la conséquence directe des caractéristiques intrinsèques des nouvelles technologies. Cette causalité a largement été mise en cause tant les mécanismes à l'œuvre qui conduisent à tel ou tel effet identifié sont variés et parfois complexes. Les effets observés s'expliquent autant par la nouveauté introduite que par la manière de l'introduire, par la façon dont les multiples acteurs impliqués s'en emparent et par les effets pragmatiques produits par leurs anticipations. De la même manière, il est malsain de réduire les programmes de recherche dans le domaine à une forme de prédiction des impacts ; prédiction d'ailleurs d'autant plus difficile que les experts eux-mêmes (scientifiques et industriels notamment) ne sont pas en mesure de définir précisément à quoi serviront réellement les nanotechnologies. Le domaine est large et mal défini. Les applications imaginables sont innombrables et beaucoup ne verront jamais le jour parce que les acteurs, économiques notamment, feront nécessairement des choix. L'évaluation globale des impacts est donc particulièrement compliquée. Elle suppose de s'appuyer sur un solide fond de recherche en mesure de qualifier les processus à l'œuvre ; elle suppose aussi d'être reconduite de manière régulière au fur et à mesure que se précisent les développements scientifiques et technologiques.

Au lieu de traiter des « impacts sociaux », la tendance dominante dans les programmes de recherche internationaux et dans les instances de régulation est plutôt de s'interroger sur *les enjeux* et sur *l'inscription sociétale* des nanotechnologies. Il s'agit de comprendre les mécanismes à l'œuvre et de préparer la mise en place des régulations sociétales qui devraient permettre de tirer effectivement profit (en termes de bénéfices pour l'humanité) de ces technologies, tout en minimisant les risques, dommages et inégalités. Les nouvelles technologies ne s'imposent pas d'elles-mêmes. La majorité des inventions ne deviennent d'ailleurs jamais des innovations. Pour qu'elles s'inscrivent effectivement dans les pratiques, elles supposent que soient engagées diverses transformations de la nouveauté technologique – qui ne rencontre pas d'emblée les inté-

rêts des acteurs dans la société – et de la société – qui doit, par exemple, transformer ses règles de droit, ses organisations et les compétences des individus.

Sur le plan de la recherche, la question est aussi de comprendre la manière dont les chercheurs peuvent intégrer dans leur travail cette préoccupation de l'insertion sociétale des nanotechnologies. L'histoire des sciences et des techniques nous enseigne que les chercheurs ne sont pas insensibles à leur environnement et intègrent partiellement les préoccupations et les modes de raisonnement contemporains, mais que cette articulation pourrait être optimisée. La mise en œuvre d'espaces de travail interdisciplinaire contribue à faire porter la réflexion au cœur de la recherche, par la réalisation d'un couplage plus étroit entre les questions sociétales et les questions scientifiques et technologiques. La question se pose donc de comprendre les processus de traduction et d'endogénéisation des questions sociétales au sein des communautés scientifiques, des institutions et des laboratoires.

1.2 « NANO » ?

Le terme « nanotechnologie » fait aussi débat dans la communauté scientifique. À part le fait de se référer à l'échelle du nanomètre (les dimensions inférieures au micron), l'éventail et la spécificité de ce que recouvre le terme est loin de faire l'objet d'un consensus. Certains restreignent le domaine aux nano-objets et aux phénomènes associés (y compris l'interaction entre les nano-objets) tandis que d'autres y incluent tous les objets dont au moins une des dimensions est nanométrique. Le flou de la définition est encore accru au niveau des nanotechnologies qui renvoient à des assemblages et à des systèmes dans lesquels les nano-objets ou les objets dont une des dimensions est nanométrique ne sont qu'un élément parmi d'autres. De même les avis sont très partagés sur leur caractère disruptif : activité séculaire (comme la chimie) « relookée », évolution naturelle pour certains,

révolution pour d'autres. Au flou de ces définitions s'ajoute un phénomène collectif dans le monde des sciences qui se traduit par l'inflation du recours au terme « nano », en vertu d'effets de mode, de visibilité recherchée et d'argumentaire destiné à convaincre les instances et partenaires qui soutiennent la recherche. La même extension se retrouve aussi très largement au niveau des débats publics où les « nanos » recouvrent un large ensemble d'objets hétérogènes (poudres, nano-machines, etc.) y compris des objets qui, jusqu'à ce jour sont plutôt des micro-systèmes (par exemple, les RFID).

Dans ce débat sémantique, certains cherchent à spécifier et à délimiter le domaine ce qui conduit à faire sortir du débat toutes une série de questions : exit les questions de respect de la vie privée avec le RFID, exit les questions de toxicité qui ne sont pas nouvelles (référence aux particules submicroniques de la silicose, de l'asbestose ou des émissions des moteurs Diesel). Or, qu'elles soient spécifiques aux nanos ou pas, qu'elles soient nouvelles ou pas, ces questions se posent ou se reposent à propos des nanotechnologies. Il est du devoir des chercheurs de ne pas les évacuer. Les « nanos » peuvent aussi être envisagées comme un cas d'école qui permet de revisiter des questions importantes.

Les nanos posent des questions de catégorisation (encore plus que dans le cas du développement des OGM) dont la résolution devrait aider à structurer des priorités et des programmes de recherche spécifique, par exemple, en fonction des différentes générations de nanotechnologie : nano-structures passives, nanostructures actives, nanosystèmes intégrés et nanosystèmes moléculaires hétérogènes. Ces différentes technologies correspondent probablement à des enjeux et des risques de natures différentes. Le domaine des nanotechnologies étant évolutif, la réflexion sur la catégorisation et sur les priorités devra elle-même être évolutive et intégrée dans le pilotage des programmes de recherche.

Les débats publics, de toutes les manières, auront probablement des conséquences pour les organismes de recherche,

comme c'est déjà le cas à l'étranger. Une institution comme le CNRS sera sollicitée pour faire progresser les connaissances là où il y a des interrogations ainsi que pour offrir une base d'expertise indépendante. Personne ne comprendrait que le CNRS ne se préoccupe pas de ces questions.

2 - LES DOMAINES DE RECHERCHE ET LEURS ENJEUX

Les scientifiques s'accordent à considérer les nanotechnologies comme un domaine prometteur pour traiter quelques-uns des principaux enjeux de société actuels : le développement de solutions alternatives aux énergies fossiles, la protection des ressources en eau (dépollution), le développement durable, le progrès médical (vectorisation de médicaments, biopuces), le développement de solutions pour le stockage, la transmission et l'affichage de l'information, etc.

Le problème majeur est de réussir l'inscription des nanosciences dans la société. Cette inscription sociétale se heurte à des questions et à des incertitudes majeures pour lesquelles nous manquons de connaissance : incertitudes sur les objets (nanoparticules, nanodispositifs, etc.) et leur comportement, sur la toxicité et les risques, sur les fonctionnalités et usages, sur les modèles de développement industriel, sur les nouvelles modalités de l'organisation du travail scientifique, sur la géopolitique et les régulations à l'échelle planétaire, sur la réaction des marchés et des citoyens.

La recherche au CNRS devrait fournir les bases scientifiques nécessaires permettant d'anticiper les développements et les questions qui se posent afin d'être en mesure d'accompagner le mouvement. Le CNRS et ses membres sont déjà sollicités pour participer aux débats publics. Il pourrait se donner les moyens de

construire des programmes de recherche sur les questions qu'un débat public ne saurait suffire à trancher. Ainsi, il sera probablement interpellé sur des questions telles que : comment sont décidés les programmes de recherche ? Qu'a-t-on le droit d'explorer et de quelle façon (encadrer les recherches par le droit, inventer de nouvelles procédures démocratiques pour en décider) ? Comment travailler en laboratoire pour protéger les personnels de recherche ? Quelles procédures mettre en place pour les nouveaux produits ? Que mettre en place pour suivre la compétition internationale (moyens financiers, humains, organisationnels, coopérations européennes et internationales, coopérations avec les SHS) ? Il convient aussi d'aider la communauté des nanosciences et nanotechnologies à se construire sa propre réflexivité et capacité de pilotage des trajectoires d'innovation. Les sciences sociales ont montré que se construisent des « chemins de dépendance technologique » qui restreignent l'éventail des possibles orientations de recherche (par exemple, sur des solutions non-nano). La question se pose dès lors, pour la gouvernance des programmes de recherche, de la façon de se donner les moyens d'assurer un pluralisme des choix technologiques et d'éviter les verrouillages précoces sur des trajectoires technologiques irréversibles.

Les principaux domaines de compétence, directement concernés par ces questions, sont la toxicologie, l'épidémiologie et les sciences sociales (droit, économie de l'innovation, gestion, histoire des techniques, sciences politiques, sociologie).

2.1 LA DANGEROUSITÉ DES NANOPARTICULES ET DES NANODISPOSITIFS

Concernant les nanoparticules, il est probable que leur production pour des applications diverses va croître. Institutions publiques et assureurs, ainsi qu'une partie de la communauté scientifique ont identifié qu'il y

avait urgence pour l'étude de leur dangerosité. Les industriels hésitent à s'engager dans un domaine où les risques (responsabilité engagée vis-à-vis des employés et des clients, rejet potentiel et retournement des marchés) sont encore trop élevés. De même d'autres industries comme les matériaux, la cosmétique deviennent objet de doute. Il n'y aurait développement industriel que si les risques sont connus et maîtrisés. Plusieurs institutions ont donc engagé des processus d'expertise collégiale et d'état de l'art sur les risques connus et sur les nouveaux risques potentiels. Il est unanimement reconnu que la nanotoxicologie est un large domaine de recherche encore très faiblement exploré ; les données manquent, les modèles d'analyse sont insuffisants. Le principe de précaution est appelé à être observé pour longtemps tandis que des chercheurs appellent de leurs vœux une collaboration scientifique internationale sur ces questions.

Plusieurs possibilités de financement de la recherche existent aujourd'hui dans les pays européens tandis qu'un appel à proposition a été lancé dans le cadre du 6^e PCRD de l'Union européenne. Une recherche fondamentale en amont est engagée au niveau national et européen. Elle porte sur la détection, sur la réactivité des nanoparticules ainsi que sur l'interaction nanoparticules – organisme vivant.

Toutefois, la communauté scientifique reste encore très réduite et mériterait d'être renforcée, même si les quelques laboratoires actifs dans le domaine ont pris l'initiative de se coordonner et de travailler en réseau – initiative qu'il convient de saluer et de soutenir. Le domaine s'étend de la toxicologie à la détection, en passant par la caractérisation, nécessaire pour produire des connaissances de base, qui relève de la chimie et de la physique. Les méthodes de protection (filtres, dosimétrie) font également partie du lot.

Les notions de dangerosité et de risque concernent non seulement des problèmes de toxicité, mais plus généralement d'activité et d'interactivité avec les systèmes vivants, les écosystèmes et les êtres humains pour lesquels les modèles d'analyse sont encore insuffisants.

La réponse européenne (CTEKS, 2004) (5) préconise de définir les projets nanotechnologiques en fonction des indications fournies par des disciplines comme l'écologie, la géographie et la sociologie. Les enjeux géopolitiques sont tels qu'ils exigent la construction d'un dialogue à l'échelle internationale, supporté par des programmes de recherche. Avec les nanotechnologies, les décideurs politiques sont amenés à revoir les cadres d'expertise et d'élaboration des choix scientifiques et technologiques, avec la mise en place d'une démocratie technique qui œuvre plus en amont que par le passé. Le problème est d'inventer les coopérations transdisciplinaires locales et transnationales permettant de promouvoir l'intérêt général. Une institution comme le CNRS devrait être en mesure de jouer un rôle pionnier dans ce domaine.

Concernant la toxicologie, il y a un déficit manifeste en France, qu'il s'agisse de la chimie ou des nanotechnologies, alors qu'il y a une forte demande sociétale (en 2005 et 2006, il n'y avait que 2-3 projets ANR sur le sujet). Le CNRS pourrait toutefois contribuer à asseoir la base de connaissances dans ce domaine (toxicologie, détection, protection) en se renforçant et en structurant l'effort de recherche. Sa neutralité est précieuse dans une situation potentiellement controversée, mais cette neutralité est aussi fragile et menacée dans un contexte où les équipes sont également poussées à la collaboration avec les industriels. Le problème est d'imaginer des mécanismes faisant que ses travaux soient crédibles pour les divers acteurs concernés, y compris le grand public. Or, là aussi les inconnues sont grandes ; nous connaissons encore mal les mécanismes à l'œuvre et les processus de construction de la crédibilité dans la société. Des réponses au moins partielles sont la redondance (y compris au niveau Européen) et peut être aussi une réflexion sur des protocoles spécifiques garantissant confrontation, traçabilité et contrôle externe.

La question des protections se pose à tous les niveaux :

- en entreprise : comment doivent travailler les personnels de la recherche et les employés dans les entreprises du secteur?

Faut-il aller jusqu'à imposer des laboratoires ou des unités de productions avec des enceintes confinées (à l'image de ce qui existe en chimie ou en biologie) pour avoir le droit de manipuler certaines nanoparticules ? Si oui à partir de quels seuils ?

- pour décider de certaines voies de recherches délicates, peut-on se satisfaire de dispositions générales ? Faut-il des comités ad hoc (d'éthique) pour aborder ces questions au fur et à mesure qu'elles se posent et pour définir les dispositifs opérationnels appropriés (par exemple, une police interne à la science comme dans les NIH) ?

- pour le public : quelle normes, quelle réglementation ? Faut-il un dispositif calqué sur la chimie, sur l'industrie du médicament ?

2.2 L'INSCRIPTION SOCIÉTALE DES NANOTECHNOLOGIES

Les sciences sociales ont un rôle important à jouer dans l'élucidation des mécanismes et des processus d'inscription et de régulation sociétale des produits des nanosciences et des nanotechnologies. Le succès ou l'échec des innovations est largement conditionné par des processus collectifs dans lesquels interviennent de multiples acteurs (industriels, législateurs, médias, citoyens, associations, etc.). Il importe d'en comprendre les mécanismes : analyse des représentations sociales et des formes de médiation, structuration de nouvelles élites professionnelles et sociales, analyse des formes de régulation (économiques, politiques et sociétales), analyse des processus de transformation des nanoobjets suivant les attentes de la société, analyse des processus d'émergence de nouveaux groupes sociaux concernés.

La constitution et l'implication d'une communauté de recherche en sciences sociales est largement reconnue comme importante pour aider à comprendre les dynamiques à l'œuvre et les mécanismes de légitimation des

choix technologiques et industriels. Il s'agit d'accompagner les processus de normalisation des produits et technologies ainsi que la limitation des usages, pour améliorer la vigilance sociétale et mesurer les effets des mécanismes de régulation économique, politique, sociétale en termes de protection des consommateurs et des citoyens. Les grandes questions qui se posent sont, en particulier, les suivantes :

Comprendre les mécanismes de régulation et leurs effets

Le développement des nanotechnologies constitue un bouleversement important de l'industrie et de la société qui ne peut être laissé à lui-même tant sont élevés les risques (sanitaire, environnementaux, respect des libertés et de la vie privée, etc.). Scientifiques, politiques, industriels et citoyens s'accordent pour appeler de leurs vœux une certaine régulation. Or, les mécanismes de régulation des innovations technologiques majeures sont encore très mal connus. Ces régulations sont variées (droit, administrations et action des inspecteurs, réglementations et normalisations de toutes sortes, dépôt de plaintes et leur traitement par la justice, rôle des assureurs, des consultants, des modes managériaux et des grands corps de l'Etat, débat et discussion, etc.) et le genre d'effet qu'elles produisent dans la durée reste à élucider. Un important champ de recherche pluridisciplinaire devrait être impulsé sur ces questions. Seraient directement concernés historiens, sociologues, politistes, économistes et juristes. Des travaux de recherche en histoire, par exemple, pourraient porter sur la régulation de phénomènes technologiques comme l'implantation de l'industrie chimique, de l'éclairage au gaz ou le contrôle des machines à vapeur (voir les travaux du centre Koyré). L'histoire fournit une grande gamme d'expériences qui permet de faire varier les paramètres et de montrer les effets de certains phénomènes difficiles à déceler dans le contemporain.

Il serait également pertinent d'explorer les possibilités de construction de systèmes de régulation et de gouvernance plus en

mesure d'anticiper et de faire preuve d'intelligence sociale : étude des formes institutionnelles et organisationnelles et ce qu'elles produisent dans la durée. Il convient par exemple d'étudier les effets dans la durée (sur l'innovation, les risques, l'équité, la dynamique des marchés, etc.) des différentes manières d'interpréter et de mettre en œuvre le principe de précaution.

Des questions se posent, y compris dans le domaine des brevets, concernant la normalisation et la protection de nouveaux objets dont les propriétés ne sont pas nécessairement reproductibles.

Les nanotechnologies étant convoquées dans des projets qui touchent au vivant, à l'être humain et au cerveau (y compris l'idée d'une amélioration de l'être humain), il convient de tirer les leçons de passé quant aux diverses modalités de régulation des techniques qui touchent à l'humain (déviances des personnes, dérives sectaires, usages commerciaux et dérives sociétales).

Parmi les questions que l'on voit se profiler pour l'avenir, nous retiendrons à titre d'exemple :

- l'irruption des nanotechnologies dans l'alimentation (nanofood) et la demande de réflexion sur la régulation dans ce domaine ;

- l'émergence de matériaux ou de procédés à base de nanoparticules et la question de ce qui est légitime ou non de faire (par exemple en termes de « nanorémédiation » des sols pollués) ;

- l'association entre développement des nanotechnologies, développement durable et équité ;

- l'exploration de la frontière d'humanité. Avec les xenogreffes et l'hybridation de dispositifs techniques intelligents dans le corps humain, les conceptions anthropologiques classiques de l'humanité sont remises en cause et, avec elles, les fondements des repères normatifs de l'action. Les problèmes soulevés par les acteurs portent notamment sur la construction d'êtres hybrides, les risques sanitaires

et les risques liés à l'industrialisation et à la mise en marché des pratiques innovantes.

Toutes ces questions impliqueront des débats scientifiques et de société pour la construction collective de nouveaux repères et de nouvelles régulations de l'action. Dans cette exploration collective, le fait de disposer d'une solide communauté scientifique en sciences sociales sera déterminante; elle devra permettre d'injecter dans la discussion des résultats de recherche fondés sur des travaux empiriques solides et sur une conceptualisation rigoureuse afin de ne pas laisser le seul équilibre des opinions (des chercheurs, des politiques ou des citoyens) définir les choix collectifs.

Comprendre l'éclosion et la dynamique des controverses

Après les grandes controverses (sang contaminé, vache folle, OGM) qui ont ébranlé nos sociétés depuis 20 ans, il y a fort à parier que les nanotechnologies exploseront sur la scène publique au travers de nouvelles controverses de grande ampleur. Le mélange des alliances entre sciences, industries et militaires, de la mondialisation des transactions et des débats, de la prolifération de fictions littéraires et de mouvements sociaux porteurs d'aspirations humanistes et transhumanistes, constitue le terrain approprié pour l'éclosion de grands débats portant sur les visions probables et souhaitables du monde futur. Les institutions de recherche, les entreprises et les États risquent d'être pris dans ces immenses controverses. La sociologie et les sciences politiques ont déjà développé une capacité d'expertise dans ce domaine qu'il convient de remobiliser et d'étoffer pour suivre et comprendre ce qui se joue dans le cas des nanotechnologies. Le questionnement se décline sur divers niveaux :

- comprendre à quelles conditions peuvent émerger des mouvements d'alerte et de critique au sein des réseaux scientifiques, au plus proche des dispositifs et des questions concrètes qu'ils soulèvent, comme au sein de la société. Il s'agit aussi de voir par quels méca-

nismes mettre en œuvre un processus collectif de discernement (rendu public, épreuve de tangibilité) et de tri des alertes, conduisant à la mise en place de garde-fou ;

- comprendre comment les mouvements critiques vont installer leurs dispositifs de protestation dans la durée, tenant compte d'une gamme d'action d'alertes, de critique radicale et de débat public notamment. Il s'agit de poursuivre le développement de méthodes d'analyse du suivi des mouvements de protestation, sans porter de jugement a priori et sans devenir l'instrument d'une acceptabilité sociale. Ces techniques d'analyse doivent être en mesure de suivre au plus près les dossiers, au-delà de l'effondrement des prophéties de bonheur, et de rendre compte des controverses dans leur complexité ;

- explorer les modalités d'engagement du public dans la mise en forme des priorités sociotechniques. Le questionnement est d'autant plus fondamental que le public ne constitue pas une entité simple et homogène dotée d'une rationalité unique. Un des enjeux tient au fait que l'engagement du public peut contribuer à l'identification précoce de certains risques comme à une meilleure inscription des nouveautés dans la société. On sait aujourd'hui qu'il ne suffit pas de bien informer et de bien communiquer; il s'agit de construire des dispositifs qui rendent possible la co-construction des analyses et des choix. L'éventail des méthodes délibératives et ce qu'elles construisent dans la durée reste un champ d'investigation à peine exploré.

Analyser les mécanismes de l'insertion sociale des nanomachines

Des programmes de recherche et développement sortiront de nouveaux êtres (à la frontière du vivant) avec lesquels les sociétés (droit, éthique, politique) devront composer. Les filières de production industrielle se recomposent et de nouveaux systèmes de production s'inventent. Les entreprises et les nations sont conduites à opérer des choix stratégiques parce qu'il sera de plus en plus difficile d'in-

vestir tout azimut. L'introduction de ces technologies conduit à transformer des pans importants de la vie en société, à imaginer les usages et les nouveaux réseaux sociotechniques à construire.

Les questions de recherche portent simultanément sur les transformations (législatives, professionnelles, économiques, marché de l'emploi, etc.) à l'œuvre ou souhaitables pour être en mesure de tirer profit de ces nano-ressources et pour assurer une régulation sociale à l'égard des risques émergents. Il s'agit, entre autres :

- d'analyser les visions et valeurs implicites qui contribuent à mettre en forme les nouvelles technologies sur les plans techniques et sociétaux. Ces visions et valeurs orientent et contraignent les trajectoires scientifiques et sociotechniques et expliquent en partie les irréversibilités qui se mettent en place. Or, il importe pour la société de garder un contrôle sur ces trajectoires et une possibilité d'emprunter une trajectoire alternative ;

- d'étudier la répartition des risques, des désagréments et des bénéfices (y compris la fracture nord-sud) ;

- de comprendre les conditions d'émergence des nanotechnologies et d'analyser le rôle respectif des grandes entreprises et des start-ups à l'échelle européenne. Des questions importantes se posent à propos des modèles de développement économique.

Se pencher sur le phénomène de globalisation des nano

Nous assistons à l'émergence d'un schéma de développement mondial des nanotechnologies, mais nous ne disposons pas des instruments d'analyse permettant de raisonner les mécanismes à l'œuvre, qui relèvent de l'économie, de la sociologie (des sciences comme des sociétés) et de la géopolitique. Les questions d'engagement du public et de régulation se posent éminemment au niveau planétaire. Sur ce plan, le fossé à combler sur

le plan de la recherche et des institutions est phénoménal.

2.3 RECONFIGURATION DE LA RECHERCHE ET DE L'INDUSTRIE

Le défi pour les technologues, décideurs politiques, industriels et citoyens, est de trouver les moyens d'influencer le cours des évolutions technologiques dès leurs premières mises en forme et avant que des trajectoires irréversibles se soient constituées. Ces mises en formes dépendent des interactions entre de multiples acteurs, notamment les chercheurs et les industriels. La compréhension de la constitution des trajectoires des nanotechnologies et de leurs impacts sociétaux suppose alors de prendre en compte les transformations en cours au niveau des acteurs scientifiques, technologiques et industriels. Les productions scientifiques et technologiques et leur inscription sociale dépendent de la dynamique des acteurs qui les conçoivent.

Analyser les modèles de développement scientifique

Le problème est aujourd'hui de mieux comprendre les dynamiques et les modèles de développement scientifique (convergence NBIC, concentration des ressources) et les modèles industriels. Des questions se posent aussi concernant les dynamiques différenciées des nanosciences et des nanotechnologies, ainsi que sur la diversité des chemins de décisions, la structuration de groupes experts inattendus, l'émergence de circuits de pouvoir concurrents dans le financement de la recherche. La recherche sur ces questions pourrait s'appuyer sur les laboratoires de sciences sociales déjà bien implantés en anthropologie et sociologie des sciences et en économie de l'innovation.

Sur le plan des dynamiques scientifiques : la transformation des articulations entre disci-

plines (convergence), la fusion de la science et de l'ingénierie, de la technologie et de la médecine, les nouvelles organisations du travail (plateformisation, réseaux) constituent des phénomènes qu'il convient d'analyser, d'autant plus que les acteurs scientifiques eux-mêmes s'interrogent beaucoup sur les transformations à l'œuvre ou souhaitable de leurs propres institutions, disciplines et pratiques de travail. Des questions fondamentales se posent quant à l'avenir de certaines disciplines et quant à la réalité d'une convergence entre disciplines. Sur ce plan, la recherche en scientométrie pourrait apporter une aide. De la même manière, des questions se posent quant à l'anticipation des domaines qu'il conviendrait d'investir, par exemple en regard des grandes masses de données qui résulteront de la prolifération de capteurs de toutes sortes ou de la prise en compte de la complexité. Des questions de fonds se posent quant à la manière dont les disciplines se déploient et se recomposent, en relation avec les coups de force industriels et politiques qui modifient le paysage de la recherche.

Ce qui se passe en matière de nanotechnologies est aussi exemplaire d'un double phénomène de concentration territoriale et de mise en réseau des compétences scientifiques et technologiques. Ce phénomène, majeur dans l'histoire des sciences et des techniques après l'aire de la Big Science, se traduit par la constitution de districts scientifiques et techniques. Un tel phénomène retient l'attention de sociologues, économistes, politologues, gestionnaires et géographes. Les questions portent sur la territorialisation des sciences et sur les dynamiques économiques correspondantes. Dans le même ordre d'idée, des questions se posent quant à la dynamique de l'emploi et quant aux relations Nord-Sud.

Comprendre la transformation des pratiques de recherche

Chercheurs et technologues dans les nanotechnologies agissent dans des institutions de plus en plus hybrides : de recherche

fondamentale et appliquée, privée et publique, mélangeant les disciplines (convergence). Ils sont, en outre, pris dans une spirale médiatique forte, des sollicitations industrielles accrues, des questionnements éthiques et sociétaux fondamentaux et une concurrence internationale féroce.

Dans ce contexte, l'organisation de la recherche se transforme et de nouvelles figures professionnelles de chercheurs émergent. Nous assistons à des transformations fondamentales des institutions et des pratiques de recherche qui interrogent les chercheurs eux-mêmes quant à leur identité professionnelle et aux finalités de ce qu'ils font. Le questionnement sur l'inscription des nanotechnologies dans la société ne se limite ainsi pas à ce que si passe en aval de la recherche (médiatisation, régulation des applications et usages) ; il opère aussi au cœur des institutions productrices de connaissances certifiées et de ruptures conceptuelles pour la technologie. De la dynamique de ces institutions dépend en partie la dynamique sociétale des nanotechnologies. Il importe donc d'engager suffisamment de travaux de recherche pour comprendre ce qui s'y joue afin d'éviter d'en faire un point aveugle de la gouvernance d'ensemble. Plutôt que de se concentrer sur les seuls impacts sociétaux, encore largement indéterminables, il importe de comprendre comment ces impacts résultent aussi de modes de production scientifique et technique particulier qui posent question aux chercheurs eux-mêmes. Il en est ainsi de la mise en relation des industriels et des scientifiques des laboratoires publics, identifiée comme une faiblesse dans tous les rapports officiels. Il convient, en particulier, d'analyser les pratiques professionnelles des chercheurs qui évoluent dans un contexte d'hybridation organisationnelle instable.

Au niveau des laboratoires, il convient aussi de regarder comment les chercheurs organisent leurs activités en relation avec les différentes arènes sociétales, politiques et industrielles. Les chercheurs de base sont généralement convaincus que la science progresse, mais ils développent en même temps un regard critique, ancré sur leurs expériences au contact

des objets et des instruments, qui les porte à relativiser les mots d'ordre (industriels ou institutionnels) et les prophéties qui tendent à totaliser sous l'appellation de nanotechnologie des problèmes et des travaux de natures différentes. Ils procèdent à des choix dont la dynamique n'est pas déterminée uniquement par des facteurs intrinsèques. Les enjeux financiers de la recherche les conduisent, notamment, vers une forme de duplicité vis-à-vis des décideurs politiques et autres gestionnaires de la recherche. La manière dont s'élaborent les stratégies de recherche individuelles et collectives gagnerait à être étudiée, de même que la transformation des modalités de travail (nouvelles formes de division du travail) et des identités professionnelles. Nous manquons de recherches socio-anthropologiques portant sur les laboratoires, y compris industriels, pour asseoir une réflexion sur les dynamiques à l'œuvre et pour analyser les « modes de production scientifique et technologique ».

Comprendre l'émergence des nanos

L'émergence des nanotechnologies est un phénomène qui retient déjà l'attention des historiens anglo-saxons. De telles recherches devraient permettre de mieux anticiper ce type de phénomène. Il s'agit notamment de mieux saisir le rôle des attentes et des projections faites par les différents acteurs ainsi que l'établissement et la stabilisation de nouveaux réseaux sociotechniques. Des questions spécifiques relèvent notamment de l'économie autour des modèles industriels et de développement économique.

Comprendre les processus de reconfiguration des organisations et des professions

On assiste à des processus d'hybridation des entités de recherche et des chercheurs, sur le plan des appartenances organisationnelles et disciplinaires. Il s'y invente des agencements organisationnels (notamment autour de plateformes technologiques), de nouvelles formes

de production des savoirs et de gestion de l'innovation. Gestion par projet et gestion des laboratoires sont repensés et soulèvent des questions relevant de la dynamique des organisations et de l'harmonisation de cultures matérielles hétérogènes. Pour maîtriser les dynamiques à l'œuvre, les acteurs ont besoin d'identifier et de caractériser les nouvelles règles et structures apparues avec le développement des nanosciences et nanotechnologies, par exemple, les règles qui commandent le partage des outils de travail ou les droits de propriétés. De même, les processus de diffusion des concepts aux interfaces, notamment entre les disciplines, sont encore méconnus et sont à la source de questions récurrentes pour la politique scientifique : comment agir sur ces processus à différentes échelles ?

Il convient aussi de comprendre les alliances et résistances des chercheurs de base vis-à-vis des changements organisationnels.

Au-delà des processus d'hybridation entre organismes privés et publics, le passage aux nanotechnologies va aussi de pair avec une transformation des métiers de chercheurs et d'ingénieur dont les compétences en viennent à se rapprocher. La recherche est appelée à qualifier le phénomène et à en saisir la portée en termes de professionnalité, de construction identitaire et de trajectoire professionnelle.

Des questions se posent aussi quant à la manière d'organiser la recherche (ses finalités, son organisation disciplinaire ou thématique) et ses liens avec la société (construction de la confiance, pertinence et modalité des contrôles). Comment, par exemple, concilier valorisation de la recherche et construction de la confiance du public ?

3 – ÉTAT DES LIEUX PAR THÈME

La CID 43 « Impacts sociétaux des nanotechnologies » est supposée contribuer à la

constitution d'un milieu de recherche en mesure de traiter avec rigueur les questions sociétales nouvelles liées aux nanosciences et nanotechnologies et à produire la connaissance de base utile à la réflexion collective et à la prise de décision. Dans ce contexte, la faiblesse numérique de la recherche française en toxicologie, en épidémiologie et en sciences sociales dans le domaine est à souligner et à déplorer.

3.1 FORCES ET FAIBLESSES DE LA RECHERCHE FRANÇAISE

En France, un milieu de recherche est en cours de constitution et de structuration en toxicologie et en sciences sociales (économie, sociologie, droit, histoire et sciences politiques), mais globalement, l'expertise est nettement insuffisante en sciences sociales comme en toxicologie.

Sur la dangerosité des nanoparticules et des nanodispositifs, quelques laboratoires sont actifs et compétents dans ce domaine en France, mais ils mériteraient d'être renforcés comme le CEREGE (transferts et transformations des contaminants dans les écosystèmes) à Marseille. D'autres laboratoires sont également actifs dans le domaine et fonctionnent en réseau.

Quant à l'inscription sociétale des nanotechnologies, à ce jour, les travaux sont encore globalement assez rares, mais la situation change rapidement avec de forts moyens investis par les institutions de recherche à l'étranger.

Dans les grands colloques internationaux du domaine des *Sciences studies*, depuis 2004, les sessions consacrées aux relations entre nanotechnologies et société occupent une place croissante. Les chercheurs américains, britanniques et nord-européens y sont très présents. Un réseau international est apparu depuis 2005 sur ces thématiques : *International Nanoscience and Society Network* (INSN).

Deux équipes de chercheurs français (LATTS UMR CNRS-ENPC, PACTE UMR CNRS-Universités de Grenoble) y sont présentes.

La majorité des chercheurs en sciences sociales dans le monde anglo-saxon s'est précipitée sur le débat sociétal en traitant des problèmes éthiques et sociétaux que posent les nanotechnologies (à partir des écrits d'auteurs comme Drexler, etc. et de la science-fiction ou à partir du développement et de l'implantation de puces sous-cutanées). En France, ce sont surtout les travaux de Bernadette Bensaude-Vincent et de Jean-Pierre Dupuy (CREA, Ecole polytechnique), qui relèvent de la philosophie et de l'histoire des sciences, qui sont les plus visibles sur la question des nanotechnologies.

D'autres chercheurs se penchent sur l'imaginaire des chercheurs ou sur les perceptions du grand public, sur la mise en œuvre de débats publics (nanojury, nanoforum, etc.) et sur la médiatisation des nanotechnologies. Les travaux sont encore loin d'être satisfaisants à ce jour. Toutefois, plusieurs chercheurs français se sont engagés sur ces questions et aboutissent à des résultats fort intéressants, en particulier le travail du sociologue Pierre-Benoît Joly (INRA) concernant les modalités d'une intervention du public sur ces sujets et ceux de Francis Chateauraynaud (EHESS) qui mobilise des méthodologies de suivi et d'analyse des controverses extrêmement innovants et précis.

Les recherches en sciences politiques ne sont pas encore manifestes en France sur ces questions, tandis qu'une petite équipe de juristes du CNRS (CECOJI) développe, depuis 2005, un projet de recherche interdisciplinaire, prospectif, sur les questions de droit et nanotechnologie. Le CNRS n'est pas un acteur important, en nombre, dans le domaine du droit ; son atout serait toutefois peut être de travailler à l'interface entre le droit, les techniques et les usages. Les enjeux en termes de définition des réglementations et de leur harmonisation internationale sont considérables. Pour les sciences politiques, un objectif est d'étudier la mise en forme de nouveaux groupes d'élites qui ne reposent pas sur des trajectoires socioprofessionnelles prévisibles

et d'analyser les répertoires d'actions mobilisés par ces groupes. Il s'agit également de se pencher sur les bureaucraties techniques (en particulier, les agences) légitimes à venir pour traiter de ces questions.

Sur la question des dynamiques de reconfiguration de la recherche et de l'industrie, les travaux de sciences sociales publiés ou en cours dans le monde sont encore extrêmement rares. Peu nombreux sont les chercheurs qui se penchent sur les dynamiques scientifiques et industrielles effectivement à l'œuvre ou qui travaillent étroitement avec les laboratoires. Dans le domaine des études des politiques publiques, de l'économie de l'innovation et de la gestion, des recherches émergent aux Etats-Unis et en Europe où un réseau s'est structuré (*Nanodistrict*). Deux équipes françaises (GAEL UMR INRA – Université P. Mendès-France et LATTIS UMR CNRS-ENPC) y sont très actives. Dans le domaine de l'étude des sciences (ethnographie de laboratoire en particulier), rares encore sont les équipes actives dans le monde. L'équipe la plus active en ce domaine est actuellement l'UMR PACTE (CNRS – IEP et Universités de Grenoble); d'autres travaux sont également engagés notamment à l'Université de Göteborg (Suède) et à l'Université de Lucerne (Suisse).

Cependant, la recherche française sur ces questions est numériquement très faible et sans commune mesure avec les gros investissements consentis sur les sciences sociales aux États-Unis. La recherche française s'organise en un nombre réduit de laboratoires, dont certains regroupent déjà des équipes de taille significative, développant des échanges entre eux. Parfois, localement, comme c'est le cas à Grenoble, cadre d'une forte concentration de laboratoires actifs dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, le nombre de chercheurs et doctorants engagés, toutes disciplines SHS confondues, est tel qu'on puisse déjà parler d'un pôle d'excellence. Par comparaison aux travaux qui apparaissent dans les colloques internationaux, les chercheurs SHS français engagés dans le domaine témoignent de travaux de grande qualité et souvent origi-

naux, mais encore trop souvent peu visibles en langue anglaise.

Les forces de la recherche SHS française sur les nanotechnologies :

- quelques pôles de recherche (EHESS, ENPC, Universités de Grenoble, Polytechnique, etc.), actifs et d'excellence, qui se connaissent et développent des travaux en coopération ;

- des recherches qui se développent souvent en relation étroite avec les acteurs du domaine (institutions de recherche et laboratoire, entreprises ou acteurs du débat public). Au cours des derniers colloques internationaux, il est apparu que ce travail de sciences sociales en relation étroite avec les laboratoires du domaine constitue un atout considérable et conduit à des analyses très différentes de celles qui proviennent des seuls éléments de débat dans l'espace public ;

- des chercheurs SHS qui développent des coopérations interdisciplinaires, par exemple entre sociologie et gestion, entre droit et sociologie.

Les faiblesses de la recherche française dans ce domaine sont les suivantes :

- faiblesse numérique liée au fait que les institutions de recherche investissent très peu (un seul recrutement CNRS (6)). Le contraste est frappant avec la situation américaine où la NSF a créé en 2006 deux grosses équipes de recherche (par exemple, le *Center for Nanotechnology in Society* à l'Université de Californie à Santa Barbara avec près de 40 personnes), dotées chacune de 5 millions de dollars sur une durée de 5 ans, et structurant un réseau plus étendu de petites équipes. L'ANR a, depuis 2007, lancé un volet « aspects éthiques sociétaux » dans son programme PNANO, mais la communauté scientifique en sciences sociales sur les nanotechnologies est encore numériquement si faible que les propositions de recherche soumises se comptent sur les doigts d'une main ;

- visibilité dans le monde anglo-saxon encore insuffisante (bien qu'en progression rapide) ;

– des équipes localement très fragiles, reposant sur un unique chercheur ou enseignant-chercheur, entouré de quelques doctorants, et à la merci des ressources incitatives. Il conviendrait de stabiliser et de renforcer les quelques pôles d'excellence existants ;

– l'absence de grands programmes interdisciplinaires de sciences sociales sur les questions liées aux nanotechnologies à la différence, par exemple, du Québec, où les recteurs des universités élaborent un plan d'action pluriannuel (2006-2009) pour les sciences sociales. Ce plan a pour objectifs de définir un cadre conceptuel pour la recherche, de mobiliser rapidement les chercheurs en sciences sociales sur les questions de nanotechnologies, ainsi que de développer et d'organiser l'expertise dans le domaine. Le financement de ce plan de mobilisation des sciences sociales devrait être à hauteur de 10% du budget du programme NanoQuébec.

Globalement, même si des équipes de chercheurs en SHS travaillent étroitement avec les laboratoires actifs dans les nanosciences et nanotechnologies, les dispositifs d'échange entre disciplines sont encore insuffisants :

– il n'y a pas de noyau significatif de plusieurs chercheurs en sciences sociales au sein d'un grand labo de sciences exactes ;

– il n'y a pas de coordination des sections du Comité National concernant les questions de nanotechnologies ;

– il n'y a pas de pôles de recherche pluridisciplinaire visible, en mesure d'afficher des compétences, par exemple, en « nanotoxicologie et dialogue sociétal », en « nanotechnologie et socio-économie de l'innovation » ;

– il y a peu d'implications des chercheurs en sciences de la nature ou SPI dans le travail de recherche des sciences sociales. Le problème est aussi qu'une partie de la communauté scientifique est dans la négation des questions qui se posent. Globalement, la sensibilité des chercheurs aux questions sociétales est modeste, en particulier chez les plus jeunes. Il n'y a pas non plus de processus manifeste

d'endogénéisation de la réflexion dans la réflexion stratégique des laboratoires, contrairement à la prise en compte des dynamiques scientifiques internationales et des exigences véhiculées par le monde industriel. De plus, il y a peu de systèmes de veille et d'alerte où chercheurs de base et laboratoires jouent un rôle reconnu. Les chercheurs en nanosciences et nanotechnologies pourraient aider les sciences sociales à ouvrir la boîte noire des nanotechnologies et, inversement, s'approprier les résultats intermédiaires (par exemple, concernant les processus de territorialisation de la recherche, la reconfiguration des identités professionnelles, les modèles de développement qui orientent les dynamiques scientifiques collectives ou les questions concrètes d'équité qui s'inscrivent dans les détails de la conception des nanodispositifs, etc.) pour en évaluer les répercussions sur leurs propres recherches.

Globalement, aussi, le flux de recrutement, dans ces domaines pourtant considérés comme importants, n'est pas suffisant, ni même significatif.

3.2 LES LABORATOIRES CONCERNÉS

Nano-toxicologie

CEREGE (UMR CNRS – Université Paul Cézanne) (dir. J.-Y. Bottero) – Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement ; actif sur les questions de transferts et de transformations des contaminants dans les écosystèmes.

LBME – Laboratoire de Biogénotoxicité et Mutagénèse Environnementale (EA – Université de la Méditerranée, Marseille) (dir. A. Botta).

LCMC – Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée (Université Pierre et Marie Curie, Paris) (équipe « nanomatériaux inorganiques » dir. J.P. Jolivet).

Laboratoire de chimie analytique (Université Paris XI) (dir. F. Moussa).

Au CEA – DRECAM (Saclay) – trois laboratoires associés ou unités mixtes du CNRS : Laboratoire Francis Perrin (URA 2453, dir. C. Reynaud); Laboratoire Pierre Sue (UMR 9956, dir. B. Gouget); Laboratoire Claude Frejacques (URA CNRS 331, dir. O. Spalla).

LEMIR (Laboratoire d'Écologie Microbienne de la Rhizosphère) (UMR 163 CNRS-CEA- Université de la Méditerranée, dir. T. Heulin) : Biologie des échanges entre plantes et bactéries rhizosphériques.

Laboratoire de Cristallographie et Minéralogie de Paris (microscopie électronique).

ITODYS (Interfaces, Traitements, Organisation et Dynamique des Systèmes) (UMR CNRS-Paris VII).

SHS

CECOJI (UMR CNRS – Université d'Ivry) – Centre d'Études sur la COopération Juridique Internationale [droit] (dir. I. de Lamberterie).

Droit comparé (UMR CNRS – Université de Paris 1) (dir. H. Ruiz-Fabri) – Centre de recherche en droit des sciences et des techniques [droit].

GAEL (UMR INRA – Université P. Mendès-France, Grenoble) – Laboratoire d'économie appliquée de Grenoble [économie-gestion] (dir. B. Ruffieux).

GEMAS (UMR CNRS – Université de Paris-Sorbonne) – Groupe d'Étude des Méthodes de l'Analyse Sociologique [sociologie] (dir. T. Shinn).

GSPR (EHESS) – Groupe de Sociologie Pragmatique et Réflexive [sociologie].

LATTS (UMR CNRS – ENPC et Université de Marne-la-Vallée) – Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (dir. J.-M. Offner), équipe « Technique, Innovation et Organisation » (dir. P. Flichy).

PACTE (UMR CNRS – IEP, Universités de Grenoble) [sciences politiques, sociologie et sciences du territoire] (dir. G. Saez) – Dispositif transversal « Sciences et société » (dir. D. Vinck, C. Gilbert, Y. Chalas).

Notes

(1) « Nanosciences et Nanotechnologies : Opportunities and Uncertainties » (2004), Royal Society and Royal Academy of Engineering, www.royalsoc.ac.uk.

(2) « The National Nanotechnology Initiative » (2004), National Nanotechnology Initiatives, www.nano.gov

(3) « Nanosciences et nanotechnologies : an action Plan for Europe 2005-2009 » (2005), Commission de l'Union européenne, <http://www.euractiv.com/en/science/nanotechnology/article-117523>

(4) <http://www.eptanetwork.org/EPTA/search.php?pattern=nanotechnology&title=title&desc=desc&keyword=-1>.

(5) Nordmann A. (2004) *Rapporteur du High-Level Expert Group Foresighting the New Technology Wave – Converging Technologies: Shaping the Future of European Societies*: Report. Brussels: European Commission, 27 sept. 2004, http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/ntw/pdf/final_report_en.pdf.

(6) En ajoutant le concours 2007, le CNRS aura peut-être recruté en tout et pour tout trois chercheurs en sciences sociales pour travailler sur les nanotechnologies ; en l'occurrence, il s'agirait de deux juristes (via la CID 43) et d'un sociologue (via la section 40).

ANNEXE

ANNEXE 1 : LISTE DES PERSONNES CONSULTÉES

Pour établir ce document, la CID 43 a consulté une série de collègues repérés pour leur compétence et investissement dans le domaine de la CID :

Rémy Barré, économie

Bernadette Bensaude-Vincent, histoire et philosophie

Francis Chateauraynaud, sociologie

Claude Gilbert, sciences politiques

Pierre-Benoît Joly, économie

Isabelle de Lamberterie, juriste

Vincent Mangematin, gestion

Dominique Pestre, histoire

François Tardiff, nanotechnologue

Virginie Tournay, sociologie et sciences politiques

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 44

MODÉLISATION DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES, BIOINFORMATIQUE

Président de la CID
Bernard PRUM

Membres de la CID
Dominique CELLIER
Christian COGNARD
Gilbert DELEAGE
Érick DUFOURC
Pierre-Olivier FLAVIGNY
Christine FROIDEVAUX
Olivier GANDRILLON
Olivier GASCUEL
Thierry GRANGE
Nicolas HERMANN
Julie MAALOUM
Nathalie MAUREL
Christian MICHEL
Benoît PERTHAME
Marie-France SAGOT
Thomas SIMONSON
Éric WESTHOF

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 CID 44. 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, environnementaux, agronomiques, médicaux et pharmaceutiques. Les années passées ont vu ces disciplines se développer de façon extraordinaire (les articles les

plus citées aujourd'hui, toutes sciences confondues, sont liés à l'exploitation informatique des données génomiques). Le mouvement continuera très certainement. La biologie de demain sera largement faite par des biologistes « secs », modélisateurs et/ou bioinformaticiens, par opposition aux biologistes « humides » travaillant à la paillasse. L'objectif de la CID 44 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.

1 – 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. Ainsi, 500 génomes procaryotes sont séquençés actuellement et plus de 700 projets de séquençage de génomes bactériens sont en cours. Plusieurs souches de *E. Coli* ont déjà été entièrement séquençées, tandis que 49 génomes complets d'eucaryotes sont

aujourd'hui disponibles. Et on pourrait multiplier les exemples (levures, virus, etc.), tandis que s'estompent les frontières entre espèces: plus de 70 projets de séquençage de métagénomés sont en cours, visant à caractériser le matériel génétique à partir d'échantillons environnementaux.

Cette masse considérable de données représente un nouveau changement d'échelle. La bioinformatique s'est d'abord consacrée aux gènes, à leur comparaison, leur évolution et leur fonction. Elle peut désormais s'attaquer aux génomes. Les enjeux sont considérables. Par exemple, les études sur les bactéries sont liées à la pathogénicité ou à la diversité et à l'adaptation, et ont donc un impact potentiel direct en santé et en biotechnologie. Des génomes essentiels comme celui de *Plasmodium Falciparum* (l'agent de la Malaria, responsable de deux millions de morts chaque année dans le monde) sont largement incompris et on attend beaucoup des études comparatives. Mais les difficultés sont évidentes. Se pose tout d'abord le problème de la taille: on passe typiquement de mille nucléotides pour un gène à plusieurs millions de paires de bases dans un génome de petite taille, d'où des difficultés algorithmiques importantes. Et on sait mal aujourd'hui comment évoluent les génomes (réarrangements, éléments transposables, rôle des virus, etc.), ce qui impose des travaux de modélisation et d'estimation statistique des différents modèles envisagés.

La biodiversité se développe suite à des contingences historiques et une évolution moléculaire neutre encadrée par des contraintes structurales de développement et de régulation. Alors que la microévolution (développement horizontal de l'arbre phylogénétique) est dominée par les contingences historiques, la macroévolution (développement vertical de l'arbre phylogénétique) est très fortement contrainte pour des raisons structurales et de contrôle. La génomique comparative permet de départager et de dégager les éléments moléculaires responsables de ces évolutions biologiques. Ainsi, les travaux récents de comparaisons des génomes du macaque, du singe et de l'homme ont montré

que l'allèle trouvé chez le macaque correspond à l'allèle malade chez l'homme. De telles comparaisons, généralement aussi surprenantes qu'innovantes, ont de profondes répercussions sur notre compréhension et le traitement de ces maladies humaines.

La génomique fonctionnelle qui s'attache entre autres, à comprendre la fonction des gènes, comprend notamment l'étude massive des transcriptions, des protéines et de leurs interactions au sein d'une cellule. On assiste à la multiplicité des «-omics» (genomics, transcriptomics, 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 ». Elles 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.

2 – BIOLOGIE DES SYSTÈMES, RÉSEAUX

La biologie des systèmes, ou biologie systémique, est souvent minimisée ou même décriée. Certes, une définition claire et acceptée n'est pas simple à trouver. La biologie moléculaire et structurale produit une quantité incroyable de données précises et fines chaque année. Leur intégration en une vision tout à la fois cohérente et synthétique reste cependant bien souvent fort lointaine. Une

des raisons est que nous ne gérons pas au niveau théorique la syntaxe des flux de l'information biologique. L'objectif de la biologie des systèmes est l'étude des réseaux dynamiques créés par les objets biologiques en interaction. La biologie des systèmes ne se borne donc pas à l'étude des réseaux métaboliques ou génétiques. Des apports théoriques importants ont été réalisés ces dernières années sur les réseaux biologiques ou non. Les similarités entre ces divers types de réseaux sont surprenantes. Toutefois, une caractéristique frappante des réseaux biologiques est leur robustesse couplée à leur évolutivité. L'espace des systèmes biologiques sur lequel nous pouvons agir à des fins d'intervention, de contrôle ou de régulation apparaît donc restreint. Les conséquences de ces observations sont lourdes pour les développements en thérapie humaine et seule une compréhension globale des interactions permettra de dégager des nouvelles voies d'attaque. Les conséquences de ces travaux en biologie (au niveau fondamental tout comme pratique) n'en sont pas encore bien comprises et peu diffusées. Les travaux de biologie systémique ouvrent la voie à la biologie synthétique dont les buts consistent à utiliser en améliorant et en simplifiant les systèmes biologiques à des fins d'ingénierie et de production. Au niveau informatique, de nombreuses difficultés inhérentes à la biologie systémique proviennent des structures mêmes de recherche et de diffusion des connaissances : nous partageons et diffusons généralement des modèles plutôt que des données brutes. Comment permettre à des ordinateurs de s'échanger ces modèles, de les vérifier sur les données brutes, de les retrouver dans les publications, de les assembler et de partager les résultats avec d'autres ?

3 – BIOINFORMATIQUE STRUCTURALE

Le grand enjeu de la bioinformatique structurale est de comprendre la relation

entre structures macromoléculaires et fonctionnement biologique de la cellule. Cela passe par une compréhension large des macromolécules et de leurs complexes, en prenant en compte leurs structures, leurs mouvements, et leurs interactions. Il faut donc décrypter le vocabulaire et la grammaire d'un dialogue moléculaire très complexe à différentes échelles de taille (de l'atomique au mésoscopique), de temps (de la picoseconde à la seconde) et d'espace (compartimentation, diffusion, encombrement cellulaire). La bioinformatique structurale est fortement associée aux développements de la biologie structurale expérimentale, et donc à la fois aux programmes massifs de séquençages génomiques et aux programmes de détermination de structures tridimensionnelles. En effet, les aspects structuraux (protéiques et nucléiques, expérimentaux et théoriques) sont essentiels à la réussite des grands projets de génomique.

Dans ce contexte, plusieurs secteurs importants de la bioinformatique structurale doivent continuer à être développés ; d'autres, très récents ou nouveaux, doivent être renforcés ou créés. Un premier groupe de secteurs sont liés au problème du repliement des protéines et à 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 groupe se situe à l'interface avec les techniques de biologie structurale expérimentale : reconstruction de gros édifices 3D en utilisant des données hétérogènes (cryoEM, RMN liquide et solide, biocristallographie, fluorescence, imagerie moléculaire, AFM) ; ces secteurs nécessitent des couplages de codes informatiques et de nouveaux développements méthodologiques. Un troisième groupe concerne la compréhension des mécanismes d'assemblage macromoléculaires (e.g., approches multi-échelles) et des forces mises en jeu (e.g., expérimentations sur molécules uniques) et de leur dynamique ; ce secteur concerne notamment les réseaux d'interaction protéine-protéine,

mais aussi l'autoassemblage de membranes lipidiques. Un quatrième secteur concerne plus directement les relations structure-fonction et les mécanismes détaillés de macromolécules d'un intérêt particulier. Il inclut la simulation des mouvements moléculaires (domaines, approches de ligands), les technologies d'ingénierie *in silico* de protéines ou de ligands (d'intérêt, par exemple), et la simulation en dynamique moléculaire de gros systèmes associant protéines, membranes, ou ARN (e.g., ribosome, facteurs de transcription, protéines membranaires, entourées d'un modèle réaliste de leur environnement).

4 - 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'études 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, quels 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 codes climatiques et de dynamique des populations est à l'ordre du jour. La modélisation biologique et géophysique, ainsi que l'intégration des données génomiques, phénotypiques, écologiques, et climatiques, sont fondamentales et nécessaires.

5 – MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

Toute science passe depuis des siècles par des modélisations, très essentiellement 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, passant plus tard par des calculs de potentiels. Si la biologie dans son essence a échappé à cette modélisation – il y a des contre-exemples, tels les modèles proie-prédateurs ou les dynamiques de populations –, c'est clairement du fait de sa complexité.

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 un siècle, disons, la capacité de traiter de tels problèmes complexes : les fonctions dérivables ont cédé le pas au mouvement brownien et à ses avatars, les espaces euclidiens à des espaces de Hilbert de dimension infinie, les équations différentielles (réduites à être « ordi-

naires »!) partagent le terrain avec des systèmes dynamiques de plus en plus complexes.

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 déplacements possibles (repliement, ouverture, etc.) 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 conservent un grand rôle dans l'interaction math-biologie. Toutes les méthodes de maximisation sont mises à contribution pour tâcher de modéliser cette extraordinaire optimisation qui caractérise le Vivant. Les équations différentielles modélisent aussi bien la dynamique moléculaire que les déplacements de populations. La modélisation probabiliste est largement employée, par exemple pour représenter les événements évolutifs (mutation, spéciation, réarrangements génomiques, etc.). 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.

6 – MÉTHODES ET OUTILS INFORMATIQUES

Un axe essentiel de recherche en bioinformatique est l'algorithmique du texte. Exploiter les données génomiques nécessite des algorithmes toujours plus fins et rapides pour explorer les banques de données, trouver par alignement les séquences homologues à une séquence donnée, ou détecter des motifs et signaux, notamment représentés par des automates probabilistes ou des modèles de Markov cachés. L'alignement multiple est une tâche fondamentale (pour caractériser une famille ou en retracer l'évolution) qui nécessite toujours des développements algorithmiques. Plus récemment, de nombreux efforts se sont portés sur les réarrangements génomiques et le calcul de distances de réarrangements ; ces travaux ont entraîné des développements fondamentaux sur les permutations, qui forment aujourd'hui un champ très actif de la recherche en algorithmique.

L'algorithmique bioinformatique concerne aussi d'autres structures discrètes. De nombreux problèmes en évolution sont liés aux arbres (phylogénies) et à leur combinatoire, notamment dans le but d'assembler l'Arbre de la Vie à partir des arbres partiels que l'on peut déjà trouver dans les banques en grande quantité. Les arbres et leur algorithmique sont également centraux pour l'étude et la comparaison des structures d'ARN. L'algorithmique des graphes est elle aussi largement mise à contribution et développée, en raison de la quantité sans cesse croissante de données de type graphe, qu'il s'agisse d'interactions protéiques, ou de réseaux métaboliques et de régulation, dont on dispose pour de nombreux organismes. L'objectif est alors de comparer, par exemple pour trouver des régularités statistiquement significatives.

D'autres tâches nécessitent clairement des développements informatiques. En particulier, de nombreux problèmes se rattachent à l'optimisation et/ou au calcul massif impliquant le développement de codes parallèles et distribués. C'est notamment le cas en matière de structure et de dynamique moléculaire. Il est significatif que dans ce domaine des travaux prometteurs aient été inspirés par la robotique et le contrôle des bras articulés, en suivant l'analogie mécanistique entre bras et chaîne protéique.

L'informatique doit également répondre aux défis présentés par l'analyse intégrée des données de la biologie à grande échelle. Celles-ci sont non seulement volumineuse et en croissance rapide, mais également très hétérogènes (combinant, par exemple, des données de séquences, des annotations sur celles-ci, et des données textuelles servant de référence pour ces annotations). Les nouvelles méthodes doivent incorporer des composants de fouilles de données développés dans les domaines de la statistique et de l'intelligence artificielle, ainsi que des méthodes de classification. En outre, des techniques d'analyse de l'information doivent être utilisées, allant de la validation et de l'affinement des données, jusqu'à l'extraction des informations pertinentes et leur utilisation dans un cadre d'aide à la décision. L'intégration étroite de ces protocoles et logiciels dans des ensembles entièrement automatiques sera nécessaire. Cette intégration exigera également des formats de données, des modèles et des ontologies standard, afin de rendre le transfert d'informations aussi transparent que possible.

7 – 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^e position (~ 120 publications),

très loin derrière les USA (~ 1000), mais aussi assez loin derrière l'Allemagne (~ 260) et l'Angleterre (~ 220), 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 le Japon, le Canada et la Chine (~ 90). Pour ce qui concerne les publications en biologie des systèmes (3), la France (23) est mal placée, loin derrière USA (~ 200), Japon (~ 85) ou Angleterre (~ 75), mais aussi, par exemple, derrière l'Italie (37) et l'Espagne (28). 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 institutionnels (1 appel ANR plutôt restrictif en 2006 et 2007, rien auparavant). Ce même facteur (avec un décalage d'une dizaine d'années, et accentué par le manque de continuité des programmes et appels d'offres) 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 SdV, 63 laboratoires sur 310 sont fléchés bioinformatique, tandis qu'en MPPU on en trouve 12 sur 335, et en ST2I 11 sur 236. Même s'il ne s'agit pas d'une mesure réelle de l'activité, cela montre que les sciences de la vie 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, dans aucun laboratoire. Enfin, on trouve difficilement plus de 4-5 laboratoires 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 CID 44 doit absolument se poursuivre et s'intensifier.

Depuis 2004, la CID 44 a assuré le recrutement (ou promotion CR1-DR2) de 33 chercheurs (*voir* le bilan 2007 pour plus d'informations). La pression était très forte, puisque nous avons auditionné environ 600 candidats. Quelques autres recrutements sur les thèmes de la CID 44 ont été faits dans d'autres sections (07, 21, 22, 29), 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 CID 44, où cet aspect est pris en compte lors des concours).

8 – RECOMMANDATIONS

On peut retenir des grands axes présentés ci-dessus quelques mots clefs : génomique comparative et fonctionnelle, biologie structurale, réseaux biologiques, environnement et biodiversité, dont le développement dans les années à venir nécessitera à l'évidence des développements spécifiques en modélisation mathématique (EDP, modèles stochastiques), en algorithmique (du texte mais aussi des arbres et des graphes), en classification, et en bases de données et de connaissances. Pour mener à bien ce programme, et maintenir des recherches de premier plan en France, 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 développement des approches à grande échelle ;

2. avancées des travaux méthodologiques, car ceux-ci accompagnent (*voir précédent*) 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 CID 4, pour assurer l'intérêt sur les deux versants), mais aussi des sections disciplinaires, et aller vers SdV, mais aussi vers les autres départements, ST2I et MPPU en particulier.

Ne pas oublier, comme c'est encore parfois le cas, le suivi des chercheurs à la marge de plusieurs disciplines, dont la carrière dépend d'une section pouvant lui préférer un chercheur davantage centré sur le cœur de sa discipline. Ce suivi doit bien sûr s'étendre aux équipes et laboratoires interdisciplinaires.

Développer les équipes ou laboratoires clairement situés à l'interface, en mettant l'accent sur ST2I et MPPU (*voir ci-dessus*) et

en multipliant les laboratoires et équipes bi-appartenant. 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. Cette dernière s'est jusqu'alors montrée peu interdisciplinaire, et il conviendrait de la pousser à lancer un programme d'interface ambitieux, entre biologie, mathématique et informatique.

Développer l'activité de services en bioinformatique, qui est indispensable aux biologistes. 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. 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.

Notes

(1) Web of Science de l'ISI, période 2004-2007, nombre d'articles dont au moins un auteur est dans le pays considéré (les résultats sont similaires en considérant des périodes plus larges ou plus restreintes).

(2) Publications dans la revue *Bioinformatics* (Oxford) 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.

(3) Publications dans *Biosystems*, *Molecular Biosystems*, *Systems Biology*, *Molecular Systems Biology*.

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 45

COGNITION, LANGAGE, TRAITEMENT DE L'INFORMATION : SYSTÈMES NATURELS ET ARTIFICIELS

Président de la CID
Michel DENIS

Membres de la CID
Pascal AMSILI
Christian CAVÉ
Carlos DEL CUETO
Colette FABRIGOULE
Bernard FRADIN
Line GARNERO
Édouard GENTAZ
Christian HUDELOT
Jean-Paul LACHARME
Christian MARENDAZ
Guillaume MASSON
Jean-Luc NESPOULOUS
Élisabeth PACHERIE
Hélène PAUGAM-MOISY
Jean-Marie PIERREL
François RIGALLEAU
Jean-Luc SCHWARTZ
Catherine THINUS-BLANC
Simon THORPE
Gérard-Richard WALTER

INTRODUCTION

Le domaine des sciences cognitives regroupe un large ensemble de disciplines qui, à travers des démarches conceptuelles et méthodologiques différenciées, ont en commun de traiter du problème général de la **connaissance**. Leur objectif est de rendre compte des processus par lesquels se construit et se développe la connaissance et par lesquels celle-ci s'inscrit sur une variété de supports et de dispositifs (naturels ou artificiels). Comme c'est le cas dans toute démarche pluridisciplinaire, les chercheurs engagés dans les sciences cognitives convergent sur des noyaux conceptuels communs (comme ceux de **représentation**, d'**intelligence**, d'**agent cognitif**, etc.) et visent à élaborer une représentation (scientifiquement valide et mutuellement acceptée) des structures et des processus de connaissance qui ne soit plus tributaire d'une seule approche (comportementale, neuroscientifique, linguistique, philosophique, informatique, etc.).

L'étude de la **cognition naturelle** (celle que manifestent les organismes vivants pourvus d'un système nerveux) comprend à la fois la description de ses expressions comporte-

mentales, celle des processus qui peuvent en être inférés et celle des mécanismes cérébraux qui les sous-tendent. L'étude de la cognition inclut la compréhension des relations entre ces trois niveaux, ainsi que leur modélisation et leur simulation par des **systèmes artificiels**. En outre, les sciences de la cognition traitent des interactions entre systèmes cognitifs (naturels et artificiels), avec un intérêt particulier pour le langage, mais plus largement tous les systèmes sémiotiques de communication. Le champ inclut donc l'ergonomie cognitive et les interactions homme-machine. Enfin, le traitement de l'information, que ce soit au sein des systèmes cognitifs ou dans les interactions entre systèmes, fait partie intégrante de ce champ de recherche pluridisciplinaire.

Dans ce contexte, l'interdisciplinarité n'est pas envisagée comme une fin en soi, mais comme un instrument de progrès dans la construction d'un **savoir plus intégré** que chacun des savoirs produits au sein des disciplines. Par contraste avec des entreprises partenariales dans lesquelles une interdisciplinarité « de service » consiste essentiellement en l'emprunt de méthodes au service d'un objectif délimité, l'interdisciplinarité est une nécessité intrinsèque dans la pratique des sciences cognitives, une démarche au long cours qui se développe sans être bornée par des échéances temporelles prédéterminées. Les sciences cognitives fondent leur identité sur un dialogue permanent autour d'un objet qui n'appartient en propre à aucune des disciplines participantes.

LA DYNAMIQUE DES SCIENCES COGNITIVES : CINQ TRAITS SIGNIFICATIFS DE LEUR ÉVOLUTION RÉCENTE

Il est utile, dans un document visant à refléter la conjoncture d'un domaine scientifique, de signaler les aspects majeurs de son évolution au cours des dernières années, reflets de la dynamique qui a marqué et continue de marquer les sciences cognitives.

1. En France, les sciences cognitives se sont constituées au cours des années quatre-vingts autour d'un **noyau de départ** incluant la psychologie, la logique, la philosophie, les sciences du langage, l'informatique, disciplines du premier cercle auxquelles se sont assez rapidement rattachées les neurosciences. Pour être précis, ce ne sont pas ces disciplines dans leur entier qui se sont engagées dans le programme des sciences cognitives, mais une fraction – plus ou moins importante – de chaque discipline. Si la psychologie scientifique s'identifie largement aujourd'hui à la psychologie « cognitive », les autres disciplines incluent des secteurs qui restent étrangers aux préoccupations cognitives. Ainsi, si une partie des neurosciences est franchement « cognitive », une bonne partie des neurosciences ne l'est pas du tout. Au cours des années, des secteurs d'autres disciplines se sont rapprochés des disciplines à fort contenu cognitif. L'extension s'est faite vers de **nouveaux champs disciplinaires** qui sont parties prenantes des sciences cognitives : l'anthropologie, l'éthologie, la géographie, les mathématiques, la physique théorique, l'économie. L'objectif n'est pas, pour le domaine qui nous occupe, de revendiquer toutes les sciences, mais de veiller à ce que les disciplines qui rencontrent une thématique cognitive aient la possibilité effective de la partager avec les autres disciplines.

2. Les sciences cognitives se sont constituées initialement autour des fonctions cognitives « classiques » : sensori-motricité, langage, mémoire et apprentissage, mécanismes attentionnels, raisonnement et résolution de problèmes. Les années récentes, sous l'influence des contributions issues des nouvelles disciplines, ont vu le domaine s'étendre à de **nouveaux champs** et de **nouveaux objets**. Ainsi, le domaine des émotions et de l'affectivité – qui restait éloigné de celui de la cognition « rationnelle » – est maintenant entré dans le champ des sciences cognitives. Une autre tendance s'est manifestée depuis peu, celle d'un intérêt grandissant pour les performances collectives (qu'il s'agisse de sociétés d'insectes ou encore d'agents d'un système économique). L'approche génétique des fonctions cognitives

commence elle-même à prendre un tour prometteur. En bref, l'état des sciences cognitives n'est pas figé et connaît un renouvellement permanent.

3. L'évolution des sciences cognitives se confond avec celle de leurs **paradigmes**. Les premiers âges des sciences cognitives ont reflété un ancrage assez fort dans les **modèles symboliques** (faisant appel à des modules de traitement reliés au sein d'architectures supervisées par des mécanismes de contrôle). Puis se sont développées les **approches connexionnistes** (tenant l'apprentissage comme le résultat de modifications de connectivité entre des unités de traitement). La période plus récente est marquée par le développement de la **modélisation computationnelle**, celui de systèmes dynamiques non linéaires et l'émergence de la statistique bayésienne au service des sciences du vivant.

4. Le développement des sciences cognitives a été fortement affecté par le développement de **technologies avancées** mises au service de la recherche. La **neuroimagerie**, à travers ses méthodes en évolution rapide, a certainement contribué à infléchir les problématiques vers une prise en compte plus importante de l'infrastructure cérébrale des conduites et des processus cognitifs. L'exploitation des données fournies par la neuroimagerie révèle à son tour le besoin de modèles mathématiques en vue d'intégrer les propriétés de larges ensembles neuronaux comme bases des fonctions cognitives. Plus récemment, les techniques de **réalité virtuelle** et de **réalité augmentée** jouent un rôle important non seulement dans l'investigation des fonctions sensori-motrices, mais aussi dans les démarches de remédiation et de traitement des handicaps.

5. Depuis une dizaine d'années, les sciences cognitives illustrent une articulation de plus en plus marquée avec les **besoins de la société** et une prise en compte des enjeux de **santé** et de **remédiation** (vieillesse, handicaps cognitifs, handicaps sensoriels, psychopathologie). Les **secteurs industriels** tendent également à s'ouvrir de plus en plus aux sciences cognitives (qu'il s'agisse de l'ingé-

nerie de la langue, de l'ingénierie de la santé ou de l'ajustement des produits industriels aux « usages »). Ce terrain a été largement préparé par la recherche en ergonomie cognitive, dont l'importance est largement reconnue, mais dont les efforts ne sont pas suffisamment soutenus par nos organismes de recherche.

Le domaine des sciences cognitives est donc en renouvellement continu. Sa respectabilité scientifique est tributaire du fait qu'il s'appuie sur **des disciplines fortes dont l'identité ne se dilue pas dans la démarche interdisciplinaire**. Même dans un paysage contemporain où les institutions de recherche restent préoccupées de l'ancrage de leurs opérations sur des spécialités disciplinaires bien identifiées, les sciences de la cognition poursuivent un programme important de recherche fondamentale et font bénéficier plusieurs secteurs de la société de leurs avancées (éducation, santé, réhabilitation). L'attractivité du secteur ne faiblit pas, comme en témoigne le maintien à un niveau élevé des candidatures qui se portent sur les postes interdisciplinaires (depuis 2005, une moyenne comprise entre 100 et 120 candidats se présentent chaque année sur les concours de la CID 45), ce qui rend d'autant plus nécessaire que les organismes et agences à large potentiel interdisciplinaire, au premier rang desquels se trouvent le CNRS et l'ANR, développent les programmes adéquats dans le domaine.

COMMENT STRUCTURER UN RAPPORT DE CONJONCTURE SUR LES SCIENCES COGNITIVES ?

Il n'existe pas de structure canonique de description du champ des sciences cognitives qui puisse servir de guide pour présenter un bilan sur l'état des sciences cognitives, mais on trouve au contraire une pluralité de structurations possibles.

1. Parmi ces structurations, une méthode demandant sans doute assez peu d'imagination

est celle qui consiste à passer en revue, l'une après l'autre, les **disciplines** constitutives du champ. Cette formule permet de mettre l'accent sur les contributions spécifiques, mais de façon éclatée. La méthode aurait toutefois un avantage, celui de refléter le degré d'implication de chacun des grands champs disciplinaires dans la démarche interdisciplinaire.

2. Une autre méthode pourrait consister à passer en revue les grands **domaines** ou les grands «**objets**» des sciences cognitives. Ainsi découperait-on le champ de la façon suivante :

a) la cognition comme produit et manifestation de **systèmes naturels** (au niveau individuel et au niveau collectif, tant chez l'humain que dans les espèces animales) ;

b) la cognition telle qu'elle est réalisée, modélisée, construite, implémentée au sein de **systèmes artificiels** (traitement du langage, synthèse de la parole, compréhension artificielle, vision artificielle, robotique) ;

c) les **interactions** entre formes naturelles et formes artificielles de la cognition ; la question de leurs analogies et de leurs spécificités ; les problèmes (à la fois théoriques et applicatifs) posés par l'adaptation de la cognition naturelle aux systèmes artificiels (communication homme-machine, interfaces homme-machine et cerveau-machine, multimodalité) ;

d) les avancées en matière de **modélisation** (modélisation en logique, en sciences du langage, cognition distribuée, réseaux de neurones artificiels, systèmes multi-agents, approches mathématiques de la complexité, etc.).

Ce découpage a, de fait, déjà été utilisé dans de précédents Rapports de Conjoncture. Sa valeur est de permettre une approche plus intégrée, et hiérarchisée, des domaines.

3. Nous avons opté ici pour une formule sensiblement différente des deux précédentes, afin de mettre l'accent sur les **attentes scientifiques** émergeant au sein des grands domaines disciplinaires des sciences cognitives et qui se traduisent par la recherche d'interfaçages avec d'autres domaines. Dans la mesure où le présent exercice est mené en réponse à une demande de l'organisme CNRS, nous pas-

serons en revue les attentes identifiables au sein des champs qui correspondent aux quatre Départements Scientifiques qui ont vocation à couvrir les sciences cognitives (et, institutionnellement, assurent la tutelle de la CID 45). Ainsi, nous passerons en revue les questions qui émergent au sein des **sciences du vivant** et qui servent aux chercheurs de ces domaines pour susciter des opérations de recherche partageables avec les autres secteurs de la science. Nous ferons de même ensuite avec les questions nées au sein des **sciences humaines et sociales**, puis celles nées au sein des **sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie**, et enfin celles nées au sein des **sciences physiques et mathématiques**. Pour chaque nouvelle « prise de perspective », nous introduirons brièvement le nouvel angle d'attaque de la famille de disciplines concernée, puis nous développerons les lignes de recherche majeures qui structurent le domaine.

1 – LES SCIENCES COGNITIVES VUES DEPUIS LES SCIENCES DU VIVANT

Il est classique d'entrer dans le paysage des sciences cognitives par les formes « naturelles » de la cognition. La cognition naturelle est saisie par des indicateurs de différents niveaux. Les plus classiques et les plus pratiqués par la psychologie cognitive ont été et restent les **indicateurs comportementaux**. Au nombre de ceux-ci, on donnera une place privilégiée au fait que la cognition humaine s'exprime par le **langage**. Dans le présent rapport, cette dimension sera traitée dans la partie suivante. Enfin, les **traces cérébrales de la cognition** fournissent des indicateurs d'une autre nature, dont il s'agira de comprendre les relations avec les indicateurs comportementaux et de chercher à en modéliser les caractéristiques.

1.1 L'APPROCHE DES PROCESSUS COGNITIFS COMPLEXES

Une des caractéristiques récentes de la psychologie et des neurosciences est l'apparition de nouveaux champs de recherche impliquant la prise en compte de **comportements très élaborés** (les comportements économiques en sont un exemple). Cette extension des problématiques inclut aussi des préoccupations sur les conduites sociales (humaines et animales) et sur la dimension émotionnelle des conduites humaines. L'idée nouvelle qui sous-tend cette évolution est que l'on ne peut plus séparer aujourd'hui les **processus de bas niveau** et les **processus de haut niveau**, alors que ce clivage a assuré une claire distribution des rôles parmi les chercheurs dans les dernières décennies. Pour des processus considérés comme de haut niveau, par exemple les processus liés à la conscience, il est désormais acquis que l'on prétende en étudier les bases, y compris les bases neurobiologiques. Cette évolution s'accompagne bien entendu d'un renouvellement des méthodes. Par exemple, les techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée permettent d'aborder des problèmes classiques des sciences cognitives – comme les relations entre le naturel et l'artificiel – dans des termes totalement renouvelés.

Cette attractivité des processus complexes est à l'origine de la floraison de nouvelles « disciplines » qui signalent leur volonté de modifier leur niveau d'approche en leur conférant une qualification neuroscientifique (« neuro-économie », « neuro-philosophie », « neuro-géométrie », « neuro-esthétique », etc.). Cette pratique suggère implicitement que l'on serait interdisciplinaire en passant directement d'une discipline donnée vers les neurosciences, c'est-à-dire sans passer par la **modélisation psychologique**. Ce court-circuit dans la démarche est une source de préoccupation pour la psychologie, qui est la discipline la mieux équipée pour fournir des modèles cognitifs documentés, inspirés de théories étayées par des méthodologies com-

portementales elles-mêmes bien attestées. Cette tendance profonde est peut-être, dans le même temps, un des facteurs du relatif affaiblissement de la psychologie dans la recherche scientifique française, alors que la situation de la discipline n'est pas aussi préoccupante dans d'autres grands pays développés. Personne n'est dupe de l'inclination grandissante à introduire de la neuroimagerie dans un programme de recherche pour « cognitiver » celui-ci et en même temps accentuer sa respectabilité scientifique. Ceci étant posé, la neuroimagerie est un instrument scientifique désormais incontournable de la psychologie à condition que son utilisation soit guidée par des hypothèses. Un corollaire de cette considération est qu'il est essentiel pour la neuroimagerie de ne pas être découplée de la recherche en sciences cognitives.

Les **grandes fonctions cognitives naturelles** constituent la matière majeure de la psychologie. Outre le langage (traité dans la partie suivante), les recherches sur la mémoire sont particulièrement bien représentées en France. Nos équipes jouent un rôle crucial dans le développement des recherches sur l'apprentissage implicite. Il est d'ailleurs remarquable que ces recherches se développent en relation étroite avec celles sur le langage (à travers l'étude de la capacité à repérer implicitement des mots dans une suite entendue). Elles aboutissent à un modèle du rôle de la conscience et de l'attention dans l'apprentissage. De nouveaux groupes se développent, qui participent aux recherches sur la localisation cérébrale des opérations d'encodage et de récupération en mémoire explicite. Les recherches sur les processus attentionnels et les processus de planification de l'action sont également bien développés en France. Ces recherches sont liées à celles sur les effets du vieillissement cognitif normal et pathologique, et plus largement sur les effets cognitifs des maladies neurologiques et psychiatriques. Les applications constituent des enjeux de société très importants. Un domaine dans lequel la France occupe une bonne place internationale dans les recherches comportementales et dans les interactions avec informaticiens et géographes est celui de la cognition spatiale. La

représentation mentale de l'espace et la planification des conduites spatiales s'appuient sur la conjonction de fonctions comme la mémoire, le raisonnement, la capacité de traduire une perspective égocentrique sous forme allocentrique et vice versa. Là aussi, l'étude des dysfonctionnements et le développement des aides à la navigation prennent une importance grandissante.

Les comportements et les processus cognitifs et neurophysiologiques qui leur sont sous-jacents sont ancrés dans des **fonctionnements sociaux** qui ont une grande importance chez l'homme et dans de nombreuses autres espèces. Or cette dimension demeure trop peu représentée actuellement en psychologie cognitive, alors même que l'on assiste au plan international à un essor des neurosciences dites sociales et affectives. 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 branche de la psychologie étudiée :

- a) la manière dont l'individu organise mentalement son environnement social (comment il encode, stocke et récupère l'information sur cet environnement) ;
- b) les conséquences de cette organisation avec ses composantes affectives et émotionnelles sur l'interaction sociale ;
- c) l'influence de cette interaction sur les fonctionnements cognitifs eux-mêmes (mémoire, attention, langage, etc.).

Ces questions constituent une partie intégrante des sciences cognitives, forte d'importantes implications sociétales dans les domaines de l'éducation, de la santé et du travail. La recherche dans ce secteur, malheureusement, n'est pas suffisamment encouragée. Elle l'est partout ailleurs en Europe et aux Etats-Unis depuis 20 ans, et plus encore aujourd'hui en raison de son importance dans les programmes interdisciplinaires impliquant par exemple les neurosciences intégratives, la sociologie ou l'économie.

L'éthologie apporte une contribution essentielle à la compréhension de l'organisation des conduites et à l'étude des communications interindividuelles. Elle est au premier plan dans la percée actuelle qui se développe dans l'étude des **comportements collectifs**. L'interaction sociale est examinée pour ses effets sur la plasticité des conduites et sur l'émergence des différences individuelles. Les travaux menés dans les unités CNRS d'éthologie montrent comment la transmission épigénétique des comportements est affectée, par exemple, par les styles de maternage. La neuro-éthologie et l'étude de la communication (notamment chimique) dans la reconnaissance intra- et interspécifique font partie des méthodes de pointe de nos laboratoires. La signification de ces recherches tient au fait qu'elles nous renseignent non seulement sur des processus individuels, mais aussi sur des processus qui guident la dynamique des populations animales.

La complexité des conduites se révèle non seulement dans le contexte de la normalité, mais encore davantage dans les **évolutions pathologiques** de ces conduites. Le vieillissement cérébral fait partie des enjeux majeurs de la recherche en sciences cognitives. Ce secteur se développe avec une préoccupation visant à éclairer les thérapies et les procédures de réhabilitation. Dans le domaine de la psychopathologie, des désorganisations diverses, comme l'autisme ou les phobies, sont examinées sous l'angle de leurs composantes cognitives. La réalité virtuelle est utilisée dans des programmes de remédiation. Enfin, la neuropharmacologie est un secteur important, dans la perspective de la mise au point de molécules susceptibles de contribuer à la réparation de fonctions cognitives altérées. Un autre aspect concerne le fait que la consommation de psychotropes (légaux ou non) entraîne des « changements cognitifs » encore mal connus. L'évaluation de l'incidence des psychotropes sur les fonctions cognitives n'est pas ignorée par les chercheurs, mais davantage de recherche fondamentale est certainement nécessaire. Un trait important de la recherche dans ces domaines est en effet l'adoption d'une perspective de plus en plus unifiée entre la

recherche en pathologie et la recherche fondamentale, mais la mise en place d'interfaces entre recherche fondamentale et recherche clinique doit encore être développée.

1.2 QUESTIONS DE MODÉLISATION

L'essor des sciences du cerveau et de la cognition, couplé avec le développement de nouveaux outils d'imagerie fonctionnelle des populations neuronales impliquées dans les fonctions cognitives, entraîne une très forte demande en **modélisation** et **simulation** des états neuronaux, depuis les échelles les plus microscopiques (modèles biophysiques) jusqu'aux plus intégrées (connectivité fonctionnelle entre aires). Les **neurosciences computationnelles** et la **neuroinformatique** sont des disciplines en développement rapide à l'interface entre les sciences de la vie, les mathématiques, la physique et l'informatique. Ces dernières années, des avancées importantes ont été effectuées dans plusieurs domaines : modélisation des activités de populations (interprétation probabiliste, électrophysiologie, imagerie fonctionnelle) et modélisation du comportement (perception, programmation motrice, neuro-économie) ; modélisation de la dynamique des réseaux neuronaux artificiels (comportements non linéaires, apprentissage, émergence de réseaux structurés topographiquement) ; implémentation de modèles détaillés de neurones (modèles 3D à compartiments) ; étude de réseaux neuronaux asynchrones à large échelle basés sur les événements neuronaux. Ces efforts pour comprendre le code neuronal sont indispensables pour interfacer les systèmes biologiques et artificiels (réseaux de neurones hybrides, neuroprothèses). Ils aident aussi à mieux comprendre les bases physiologiques des signaux de l'activité neuronale (EEG/MEG, IRMf, imagerie photonique). Enfin, des projets d'interface entre biologie et physique explorent les potentialités de systèmes électro-

nerveux (intégration à très grande échelle, calcul analogique, bio-robotique).

Au niveau international, on assiste à une structuration de plus en plus importante des efforts de recherche en **modélisation du vivant**, grâce à des regroupements entre biologistes, mathématiciens et informaticiens au sein d'instituts ou de réseaux pluridisciplinaires. Un effort international important est également consacré au développement d'outils standardisés de simulation, à la mise en place de bases de données expérimentales orientées vers les modèles, mais aussi au développement de moyens informatiques pour la simulation de réseaux neuronaux d'échelles jusqu'ici inégalées. La France dispose d'un fort potentiel en biologie et en sciences et technologies de l'information, mais il lui reste encore à structurer une communauté nationale forte en neurosciences computationnelles. À de rares exceptions, elle est absente d'enjeux émergents comme les systèmes hybrides macroscopiques (neuro-ingénierie), la constitution de bases de données en neurosciences ou en imagerie ou encore l'intégration entre équipes de modélisation et équipes de biologistes ou de cognitivistes. Alors qu'elle dispose de bonnes compétences en neuroinformatique (simulation, réseaux de neurones), la France reste en retrait quant à la modélisation biologiquement inspirée des fonctions cognitives. Elle dispose en revanche d'une forte tradition en mathématiques appliquées et en physique, au CNRS comme au sein d'autres EPST ou universités. Elle devrait favoriser les interactions entre les neurosciences cognitives et ces disciplines dans des structures interdisciplinaires de taille suffisante et investir dans la formation de jeunes chercheurs à la charnière entre physique et biologie ou entre mathématiques et neurosciences.

1.3 SCIENCES DU VIVANT ET SCIENCES DE L'INGÉNIERIE

Il est bien reconnu aujourd'hui que parmi les questions majeures des sciences cognitives, des questions particulièrement centrales se situent à l'interface entre les **sciences du vivant** et les **sciences et technologies de l'information**. Les interactions entre les chercheurs de ces deux grands domaines sont une réalité, mais qui demande assurément à être plus fortement développée. Si l'on considère par exemple un cas concret, l'étude de la vision, il apparaît la situation suivante. D'un côté, il existe une communauté importante travaillant sur divers aspects de la vision des systèmes biologiques. Ces chercheurs utilisent une grande variété de méthodes allant de l'enregistrement des neurones au sein du système visuel à la psychologie expérimentale, en passant par l'imagerie cérébrale, pour ne mentionner que quelques exemples. De l'autre côté, et plus particulièrement en France, il existe une autre communauté constituée en grande partie de chercheurs ayant une formation d'ingénieur qui tentent de développer des systèmes artificiels capables de « voir ». Or, bien que ces deux communautés s'intéressent à la vision, il s'agit de deux mondes pratiquement découplés. De fait, le nombre de chercheurs qui participent à la fois aux grands congrès de vision artificielle et aux colloques de vision naturelle reste modeste.

Or, il existe de véritables signes d'une convergence entre la vision biologique et la vision par machine. Il y a une dizaine d'années, les données venant de la biologie sur la rapidité du système visuel soulevaient des doutes concernant le type d'architecture de traitement utilisé. Spécifiquement, il semblait qu'une partie importante des traitements pourrait se réaliser en mode dit « feed forward ». À l'époque, ce principe semblait être en contradiction avec la plupart des modèles de vision par machine qui avaient besoin de beaucoup de processus de type itératifs pour, par exemple, segmenter des scènes. Or, les meilleurs algorithmes de catégorisation des scènes et

des objets par ordinateur d'aujourd'hui adoptent des architectures très proches de ce que l'on trouve en biologie, c'est-à-dire, des architectures hiérarchiques qui fonctionnent en grande partie en mode « feed forward ». Plus généralement, les interactions entre chercheurs travaillant sur le vivant et l'artificiel sont extrêmement bénéfiques pour les deux communautés. Les ingénieurs ont avantage à ne pas ignorer ce que l'on peut apprendre des systèmes vivants, tandis que les chercheurs en biologie ne peuvent se soustraire aux questions visant à comprendre « comment » fonctionnent les systèmes complexes. L'utilisation de la simulation par ordinateur est un moyen pour eux de tester leur niveau de compréhension et d'affiner leurs modèles.

1.4 TRAITEMENT DU SIGNAL EN IMAGERIE CÉRÉBRALE

Si l'imagerie fonctionnelle cérébrale a beaucoup contribué à la compréhension des **bases neurales des fonctions cognitives**, c'est en grande partie grâce aux développements méthodologiques en statistiques, traitement du signal et des images réalisés pour interpréter les données recueillies dans les diverses modalités d'imagerie. Ainsi, de grandes avancées ont été faites sur les méthodes de détection des activations en IRM fonctionnelle et sur les méthodes de localisation des sources des signaux enregistrés en MEG et EEG. Les recherches les plus innovantes dans ce domaine concernent la fusion de données entre les différentes modalités, qui est devenue d'actualité grâce à l'apparition des systèmes d'acquisition EEG compatibles avec l'IRM fonctionnelle. De plus, afin non seulement de localiser les aires cérébrales impliquées, mais également de trouver les liens fonctionnels entre ces régions, les recherches actuelles concernent l'estimation des connectivités fonctionnelles, qui se traduisent soit par des corrélations temporelles entre les signaux BOLD recueillis en IRM fonctionnelle, soit par des relations dynamiques entre les activités

neuronales, recueillies en MEG et en EEG, issues de différentes aires du cerveau. Ces dernières sont basées sur l'hypothèse d'assemblées de neurones transitoires qui se formeraient par la synchronisation de leurs activités pour réaliser un comportement donné. De nombreuses méthodes ont été ainsi développées pour mesurer les synchronisations entre les signaux recueillis directement sur les capteurs ou, mieux, entre les aires corticales après avoir appliqué des méthodes de problème inverse pour localiser les activités MEG et EEG. Enfin, avec le développement récent de l'imagerie de diffusion en IRM, il est possible de reconstruire les trajets des faisceaux de fibres blanches, donnant ainsi accès au substrat anatomique de cette connectivité.

La recherche en France possède des équipes de neuroimagerie reconnues internationalement, réparties entre le CEA, l'INSERM et quelques équipes au CNRS. Cependant, cette recherche souffre de la dispersion et du manque de grands centres d'imagerie interdisciplinaires, réunissant biologistes, psychologues, physiciens, mathématiciens et spécialistes de traitement du signal et des images, comme c'est le cas dans de nombreux centres au Royaume-Uni, aux Etats-Unis, au Japon ou, tout récemment en France, à l'initiative du CEA. La création envisagée de grands centres de recherche en neurosciences en France devrait favoriser de tels rapprochements.

2 – LES SCIENCES COGNITIVES VUES DEPUIS LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Il existe de nombreux points, au sein du vaste territoire des sciences humaines et sociales, à partir desquels peuvent être définies des problématiques partageables avec d'autres sciences cognitives. Deux disciplines constituent sans doute les sources essentielles de l'investissement intellectuel dans les sciences

de la cognition, à savoir les sciences du langage et la philosophie. L'anthropologie constitue un autre domaine au sein duquel a émergé une « anthropologie cognitive ». Quant au domaine de l'économie, il a commencé à manifester lui aussi un intérêt pour les sciences cognitives, qui n'est pas sans rapport avec l'intérêt grandissant des chercheurs pour l'étude des réseaux sociaux d'agents cognitifs.

2.1 LINGUISTIQUE, PSYCHOLINGUISTIQUE ET NEUROPSYCHOLINGUISTIQUE

Alors que les recherches sur la production et la compréhension du langage sont au cœur des considérations linguistiques et psycholinguistiques depuis des décennies, notre connaissance de ces phénomènes éminemment cognitifs reste encore partielle. Un enjeu majeur est de développer des approches intégrées confrontant des *théories linguistiques* à des *données expérimentales* en ne négligeant aucun aspect du phénomène (de la variabilité acoustique et l'audition à la sémantique et la pragmatique). Dans ce contexte, qui a déjà donné des résultats, s'est révélée la pertinence de certaines initiatives : procéder à des comparaisons translinguistiques ; prendre en compte la variabilité interindividuelle (une partie importante de la variabilité observée en perception et compréhension peut trouver son origine dans des processus de très bas niveau, ce qui suggère que l'on gagnerait à renforcer l'interface neurosciences/sciences cognitives en prenant en compte les connaissances acquises – entre autres – en phonétique) ; développer la modélisation, afin de rendre la France davantage présente dans les débats sur les modèles cognitifs du langage. En particulier, la conception de modèles dynamiques, inspirés par exemple des travaux sur les systèmes dynamiques complexes, est un enjeu majeur. Plus généralement, davantage d'attention mériterait d'être portée sur les avancées issues des sciences de la complexité, domaine

où la présence d'équipes françaises est en croissance. On notera à ce propos que la question des **données** en linguistique est abordée aujourd'hui sous un jour nouveau. Le recours à de grandes masses de données numérisées, de l'écrit ou de l'oral, est de plus en plus ressenti par les chercheurs comme une nécessité.

Pour reprendre une distinction souvent utilisée pour décrire le domaine, les sciences du langage s'organisent autour de trois champs disciplinaires : la linguistique, la psycholinguistique et la neuropsycholinguistique. La linguistique traite des propriétés structurelles des langues naturelles. Elle peut être pratiquée – et est effectivement pratiquée par de nombreux linguistes – en dehors de toute interaction avec les deux autres disciplines. La psycholinguistique, pour sa part, correspond à la partie de la psychologie qui s'intéresse aux faits de langage. Elle s'appuie à la fois sur des connaissances édifiées par la psychologie (en particulier, dans le domaine du développement) et sur des connaissances issues de la linguistique. Elle peut être pratiquée indépendamment de tout intérêt pour l'infrastructure cérébrale des activités langagières étudiées. Cependant, lorsque le chercheur se propose de rendre compte des mécanismes cérébraux responsables de ces activités, il s'engage dans une démarche neuropsycholinguistique, qui nécessite de s'appuyer à la fois sur les connaissances issues des deux autres domaines.

Dans les recherches psycholinguistiques menées en France, et singulièrement au CNRS, tant chez l'adulte que chez l'enfant, les études consacrées au **lexique mental** prédominent. Elles ont permis la mise en évidence de phénomènes originaux comme l'activation d'une représentation mentale de l'orthographe lors de l'audition d'un mot. Mais notre pays a surtout été un lieu important pour la modélisation de l'**accès lexical** et pour la **localisation cérébrale** des composantes du lexique mental. Ces études se développent dans deux directions : d'une part, les recherches sur les troubles du développement du langage (dyslexie, dysphasie) déjà bien entamées, et qui visent à délimiter les composantes génétiques des troubles ; d'autre part, les études inter-langues qui

visent, entre autres objectifs, à vérifier la généralité des modélisations du développement.

Un saut qualitatif a été franchi par la psycholinguistique, à savoir le passage d'une psycholinguistique essentiellement centrée sur le mot isolé au profit des mots en contexte. Il est important que les recherches psycholinguistiques ne se cantonnent pas au lexique, mais participent à l'essor des travaux sur la **syntaxe** et sur le **discours**, avec des collaborations entre les psychologues et les linguistes spécialistes de ces questions. À côté de la théorie générative et des approches qui poursuivent les mêmes objectifs, des théories nouvelles et fertiles ont vu le jour en linguistique cognitive, et des chercheurs francophones commencent à examiner leur validité psychologique, tout en proposant des modélisations précises. Parmi les questions émergentes, on notera les nouvelles préoccupations liées au bilinguisme, dans un contexte où la norme mondiale n'est plus l'unilinguisme, et aux phénomènes d'attrition (perte ou détérioration de la langue maternelle, par exemple dans des contextes d'expatriation prolongée). Une autre question est celle de la variabilité inter- et intraindividuelle, donc celle des stratégies, qui tourne de plus en plus les linguistes vers la **pragmatique**. Les liens entre raisonnement, pragmatique et cerveau commencent à se développer au CNRS, avec le lancement de programmes novateurs. Par exemple, la théorie de la pertinence fait désormais l'objet de validations expérimentales, ce qui illustre l'intérêt du dialogue entre linguistique et psychologie cognitive. Il existe aussi des modélisations des interactions pragmatiques (notamment dans le cadre du traitement des questions, des compliments, etc.).

2.2 TRAITEMENT AUTOMATIQUE DU LANGAGE ET TRAITEMENT DE DONNÉES TEXTUELLES

Dans la pratique interdisciplinaire, les sciences du langage ont un interfaçage établi de longue date avec les sciences et technologies de l'information, notamment dans le

domaine du traitement automatique du langage (TAL). Ce domaine a connu de forts développements en France, tant au CNRS que dans d'autres organismes. Au sein de cette communauté, une distinction existe entre le TAL comme industrie de la langue, où l'accent est mis sur l'aspect ingénierie, et le TAL qui s'adresse aux sciences cognitives et qui se réfère à des hypothèses sur le fonctionnement humain. Un autre secteur connaît actuellement une forte relance, c'est l'approche orientée vers les corpus, qui inclut de plus en plus une préoccupation cognitive. Corrélé à cette approche se dessine un retour du comparatisme, qui pose des questions par essence cognitives (comme la question des universaux).

Une sémantique « machinale » à gros grain est en plein essor : l'accroissement constant des documents accessibles rend nécessaire un accès le plus automatisé possible au sens des mots qu'ils emploient. Elle est stimulée par la visée d'un Web sémantique, sous l'impulsion du consortium qui gère le Web. Cette sémantique pour données textuelles volumineuses et hétérogènes s'attache essentiellement au lexique et aux relations lexicales (synonymie, homonymie, hyperonymie). Elle cherche la robustesse : la possibilité de traiter du texte « tout venant », « révisé » ou non, en quantité quelconque. C'est une sémantique de la mesure : la quantification y est centrale, et la dimension logique discrète. La tradition de sémantique proprement linguistique y pèse moins que l'ancrage dans la tradition philosophique des ontologies. Ici sont visés moins les sens que les « concepts » dénommés par les mots. Les travaux se centrent pour l'essentiel sur la désambiguïsation sémantique, c'est-à-dire l'attribution en contexte à un mot du sens pertinent en fonction d'un répertoire de sens prédéterminé.

L'autre grande direction de travail est l'**acquisition sémantique**. Ce volet recouvre d'abord la mise en évidence de similarités sémantiques entre mots à partir de distributions proches et des propositions d'organisation en « classes sémantiques », à plat ou hiérarchisées. Ce volet recouvre aussi la caractérisation des différentes acceptions d'un mot.

Les phénomènes de polysémie et d'homonymie gênent en effet la mise au jour automatique de classes sémantiques : les mots qui en relèvent établissent des « ponts » indus entre des regroupements de mots qui autrement seraient plus nettement séparés. À l'opposé, leur repérage préalable est présupposé par les recherches en induction de sens. Il repose en l'occurrence sur des connaissances lexicographiques et n'est pas effectué automatiquement.

À ces travaux se sont ajoutées plus récemment les recherches visant à dégager les principes de constitution et d'évolution des « folksonomies », ces étiquetages sémantiques opérés de manière coopérative sans visée formalisante. La compréhension de ces ontologies « naïves » est nécessaire pour exploiter la prise qu'elles offrent sur les données annotées, mais aussi pour cerner les mécanismes cognitifs de catégorisation qui sont à l'œuvre.

2.3 ORIGINE ET ÉVOLUTION DU LANGAGE

Depuis une quinzaine d'années, les études sur les origines du langage ont connu un renouveau certain. L'**émergence du langage**, et plus largement l'**émergence de la cognition humaine** qui lui est intimement liée, est abordée par les spécialistes de nombreuses disciplines, allant de la modélisation à la primatologie, en passant par la linguistique, l'archéologie, la paléontologie et la génétique.

Au sein de cette palette d'approches, la modélisation et la simulation informatique sont probablement celles qui ont connu au niveau international la plus forte croissance, et sans aucun doute celles qui accueillent le plus de jeunes chercheurs. De nombreuses avancées ont été réalisées depuis les premiers travaux sur l'émergence de conventions lexicales ou phonologiques relativement simples jusqu'aux recherches récentes mêlant robotique évolutionniste, théories linguistiques sophistiquées et modèles issus des sciences de la complexe

xité. Ce mouvement prend principalement racine dans quelques centres de recherche (Sony CSL Paris, Bruxelles, Edimbourg, Hong-kong), mais n'est guère représenté dans la recherche académique française hormis quelques chercheurs isolés. Afin de participer à cette recherche qui n'en est encore qu'à ses balbutiements et qui permet d'entrevoir de nombreuses perspectives appliquées (robots « parlants », interfaces intelligentes aux propriétés émergentes adaptées à l'utilisateur, systèmes d'acquisition ou de transfert des connaissances), il semble important de disséminer les acquis des sciences du langage parfois négligés par les chercheurs informaticiens. De même, les données de la psychologie cognitive et des neurosciences peuvent trouver une place de choix dans les recherches actuelles, en mobilisant les acquis sur la cognition humaine et en proposant des solutions cognitivement pertinentes et en phase avec les utilisateurs humains pour les futurs systèmes artificiels.

2.4 PHILOSOPHIE DE LA COGNITION

Les champs d'investigation traditionnels de la philosophie recoupent en grande partie ceux des autres sciences de la cognition. La philosophie a joué un rôle unique dans la définition des catégories fondamentales de la cognition : perception, mémoire, langage, raisonnement, action, émotion. La philosophie de l'esprit, la philosophie du langage, la phénoménologie, l'épistémologie et l'ontologie poursuivent aujourd'hui ce travail dans une interaction réciproque avec les autres sciences cognitives. La philosophie de la cognition intervient en tant qu'elle apporte une contribution spécifique, d'ordre conceptuel, à l'étude de ces objets et, réciproquement, la réflexion philosophique contemporaine bénéficie largement des éclairages nouveaux apportés par les travaux issus des sciences cognitives, éclairages qui permettent un enrichissement et un renouvellement de ses problématiques.

La philosophie de l'esprit a développé des interactions particulièrement fructueuses avec les neurosciences, la psychologie expérimentale et développementale et la psychopathologie. Il convient de souligner que, sur le plan international, les philosophes français jouent dans ce domaine un rôle pilote depuis une dizaine d'années en prenant au sérieux les exigences d'interdisciplinarité qu'implique l'épistémologie naturaliste. Ce rôle a consisté à participer non seulement à la clarification conceptuelle, mais aussi à la validation empirique des théories portant sur divers domaines de la cognition, tels que la représentation de l'action et les modalités de la conscience d'agir, la compréhension d'autrui, la conscience de soi et de son corps, la propagation des croyances ou l'évaluation métacognitive du raisonnement.

Parmi les chantiers interdisciplinaires qui se sont ouverts depuis une quinzaine d'années et dans lesquels la recherche philosophique française apporte une contribution importante, on citera :

a) la **cognition sociale** (travaux sur l'empathie, les bases cognitives de la coopération, la dynamique des croyances collectives, les bases cognitives du jugement moral) ;

b) la **cognition animale** et l'étude des formes de la pensée pré-linguistique ;

c) la **conscience** (corrélats neuronaux de la conscience, conscience phénoménale, conscience perceptive et conscience de l'action, subjectivité et conscience de soi, mémoire exécutive) ;

d) les **formes non conceptuelles de représentation** dans le domaine de la perception et de l'action ;

e) la **rationalité** et les **émotions** (rôle des facteurs affectifs dans la prise de décision et dans la fixation des croyances) ;

f) la **psychopathologie** (troubles de la conscience de soi dans la schizophrénie et l'autisme, croyances délirantes).

L'organisation de la recherche française en philosophie dans le domaine de la cognition présente trois caractéristiques importantes.

Tout d'abord, sur le plan institutionnel, elle se pratique pour l'essentiel au CNRS plutôt que dans le cadre de l'Université, encore trop largement soumise au cloisonnement disciplinaire. La deuxième caractéristique de la recherche française en philosophie dans le domaine de la cognition est de se faire en interaction très étroite avec des chercheurs des disciplines empiriques. Les centres où sont menées les recherches fonctionnent dans un environnement fortement interdisciplinaire, en contact avec des équipes de psychologie, de psycholinguistique, de neurosciences cognitives, de linguistique théorique. Enfin, ces centres entretiennent de nombreuses collaborations scientifiques en Europe et dans le monde et sont internationalement reconnus.

2.5 ANTHROPOLOGIE COGNITIVE

Alors que la psychologie s'intéresse surtout aux capacités humaines à travers leurs manifestations individuelles, l'anthropologie consacre ses efforts aux cultures, comme manifestations de ces capacités au sein de communautés de populations. La recherche en anthropologie construit alors une **science des spécificités humaines**, à la fois dans leurs caractéristiques universelles et dans leur variété. L'anthropologie a progressivement évolué vers des questions de nature cognitive, mais avec le pré-supposé majeur d'aborder la cognition comme une réalité culturellement « située ». Ainsi, l'anthropologie cognitive d'aujourd'hui s'intéresse à des objets qui sont exactement ceux dont traite la psychologie cognitive (comme la perception, la pensée, la construction du savoir, la maîtrise du nombre, etc.). Si ces questions sont abordées dans des environnements naturels, la description des données observées s'appuie sur des standards de la méthodologie empirique qui ne sont fondamentalement pas différents de ceux utilisés par la psychologie cognitive.

Parmi les thématiques à fort contenu cognitif illustrées dans les laboratoires français figure la question de la **flexibilité** des capaci-

tés cognitives humaines, comme facteur explicatif de la variabilité culturelle. On trouve également des travaux importants sur la question de la **normalité** (comment s'édifient des normes au sein d'une communauté culturelle) et sur la constitution des **identités individuelles et collectives**. L'anthropologie cognitive rend compte des structures de connaissance (« modèles » ou « schémas mentaux ») partagés par les membres d'une société. Ces structures cognitives ont une grande valeur adaptative dans la mesure où ils permettent aux individus de générer des inférences dans les situations ne contenant que des informations partielles. Les schémas en question varient très largement d'une culture à l'autre, mais l'observation intéressante est le caractère universel de la disponibilité de tels schémas. La question des modèles culturels est elle-même étroitement liée à la question des croyances. L'anthropologie révèle la variété des critères de rationalité appliqués aux croyances par différentes cultures. À cet égard, les rapprochements avec la psychologie cognitive sont d'un grand intérêt, dans la recherche de critères conceptuels permettant de différencier les « croyances » et les « connaissances ».

2.6 ÉCONOMIE COGNITIVE

Depuis une trentaine d'années, l'économie sollicite de plus en plus la psychologie. Il existe plusieurs types de collaboration. L'économie (ou finance) comportementale profite des travaux en psychologie pour expliquer post hoc les irrationalités des marchés qui ne peuvent pas être expliquées par des dysfonctionnements structurels (comme la mauvaise organisation des marchés, etc.). L'économie psychologique, pour sa part, exploite les travaux en psychologie sociale et cognitive pour réviser les axiomes des modèles de choix qui sont intégrés dans les modèles économiques. L'économie expérimentale, en s'appuyant sur la théorie des jeux, crée des économies artificielles qui permettent de vérifier les comportements économiques des acteurs dans des

situations contrôlées. Il s'agit d'un domaine bien représenté par plusieurs laboratoires du CNRS. Il existe aussi une « neuro-économie » qui essaie d'expliquer les comportements économiques en termes de structures cérébrales. Finalement, la psychologie économique applique les idées et techniques de la psychologie sociale au domaine de l'économie.

L'objet de l'économie cognitive est de prendre en compte les *croyances* et le *raisonnement* des individus dans la théorie économique, tant au niveau des agents qu'à celui de leurs interactions dynamiques et des phénomènes collectifs qui en résultent. L'expression recouvre parfois l'économie de la connaissance, c'est-à-dire l'économie des outils de connaissance et d'apprentissage des savoir-faire ou l'économie des biens d'information. L'économie cognitive est bien implantée en France, mais les autres courants mentionnés plus haut sont plus développés à l'échelle mondiale. Alors que l'économie cognitive s'intéresse surtout à la modélisation des croyances, les autres applications s'intéressent également à la modélisation des « évaluations » (pondération relative des gains et des pertes, des résultats à court et à long terme, etc.). Pour ces raisons, ils puisent largement dans les résultats de la psychologie sociale (qui s'intéresse elle aussi à l'évaluation et aux affects) et ceux de la psychologie animale (les modèles de « temporal discounting » ont leur origine dans les recherches sur les délais de gratification chez le rat).

La place des sciences cognitives en économie reste très marginale, en dépit des contributions de personnalités scientifiques de premier renom (comme H. Simon et D. Kahneman). Pourtant les apports des sciences cognitives à la compréhension profonde de concepts centraux de l'économie comme les croyances et leur révision ou encore le raisonnement face aux capacités cognitives limitées sont essentielles. Inversement, les sciences cognitives se sont longtemps intéressées à la cognition de l'agent individuel indépendamment de son insertion sociale. Pourtant, une stratégie fondamentale pour aborder la cognition consiste à poser le principe qu'un agent pense et agit rationnellement dans une société où les

autres agents font de même. Pour ce faire, une interaction forte entre les sciences cognitives et les sciences économiques et sociales est incontournable.

3 – LES SCIENCES COGNITIVES VUES DEPUIS LES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE L'INGÉNIERIE

La perspective considérée ici est celle des sciences computationnelles ou sciences de l'ingénieur, pour la partie d'entre elles qui visent la simulation des fonctions cognitives et sensori-motrices humaines, avec pour implication un engagement avec des partenaires spécialistes de la cognition humaine.

3.1 VARIÉTÉ DES OBJECTIFS ET DES RÉALISATIONS DES SCIENCES COMPUTATIONNELLES DANS LE DOMAINE DE LA COGNITION

Les efforts de modélisation développés par l'ingénierie ont des objectifs variés, qui peuvent néanmoins être regroupés en deux grandes classes pour la clarté de l'exposé : d'une part, on trouve les travaux qui visent à *modéliser pour comprendre des observables* fournis par la nature ou par l'expérimentation ; d'autre part, on trouve les travaux qui visent à *modéliser pour créer des artefacts* ayant pour vocation d'étendre le champ des activités humaines.

La première démarche consiste en la création d'outils qui servent à l'observation et à l'analyse (domaine illustré par les informaticiens spécialistes du traitement du signal) ou

en l'élaboration de techniques et d'outils conceptuels permettant de modéliser des phénomènes. À cette catégorie appartiennent les outils probabilistes (dont les outils bayésiens) et l'analyse statistique non linéaire. S'y rattache également l'héritage, aujourd'hui largement partagé, issu de l'intelligence artificielle, des réseaux de neurones, des systèmes dynamiques (dont il est utile de rappeler qu'il s'agit d'outils conceptuels originellement développés par des physiciens et qui ont été « empruntés » par d'autres disciplines).

La seconde démarche se propose d'effectuer des simulations en vue de créer des artefacts que l'on rangera eux-mêmes en deux catégories :

a) d'une part, on distingue les artefacts qui constituent des « **prolongements** » de **l'humain**, c'est-à-dire qui assistent des opérateurs dont les capacités cognitives ou sensorimotrices sont par nature limitées. Les meilleurs exemples de « prothèses » développées dans ce contexte sont les différentes sortes de « bio-artefacts » mis au service des personnes souffrant d'un handicap sensoriel ou moteur. Ici se retrouvent les chercheurs impliqués dans la mouvance de recherche NBIC (pour « nano-bio-info-cognitive »). Mais ici se retrouve plus généralement toute la recherche sur les interfaces, l'analyse de la parole, l'analyse de scènes, les systèmes de reconnaissance des émotions, la réalité virtuelle, la robotique cognitive et les interactions multimodales ;

b) d'autre part, on trouve les **systèmes partenaires** et les différentes formes d'**interactions médiatisées**, où la puissance de l'outil informatique vient servir des objectifs cognitifs. Les domaines les mieux illustrés à l'heure actuelle sont l'intelligence « ambiante », « l'ubiquitous computing », les « objets communicants » et les systèmes embarqués. Les systèmes ainsi développés requièrent une forte implication des chercheurs en **ergonomie**, qui sont garants de l'ajustement de ces systèmes aux capacités individuelles des opérateurs.

Enfin, les deux secteurs ainsi décrits entretiennent entre eux des liens étroits. En fournis-

sant des modèles de la perception (surtout la vision) et des modèles de perception-action, les neurosciences nourrissent l'inspiration des roboticiens, avec d'évidentes applications dans le domaine de la navigation et de l'orientation dans l'espace. Ici, la notion « d'affordance », venue de la psychologie, répond à des besoins exprimés par les roboticiens. Une ligne de recherche en fort développement est celle des **interfaces cerveau-machine**, qui font l'objet d'un démarrage remarqué au niveau international. C'est le cas, en particulier, des neuroprothèses, qui consistent à commander un système artificiel à partir de signaux neuronaux. On est bien ici au cœur de la problématique des interfaces entre systèmes naturels et systèmes artificiels, servie à la fois par une modélisation avancée et des technologies de pointe. Quelques équipes françaises animent des projets notables dans ce domaine, impliquant des neuroscientifiques, des mathématiciens, des informaticiens et des roboticiens, mais aussi, lorsque la recherche s'oriente vers la réhabilitation des handicaps, des équipes médicales.

L'autre domaine privilégié des relations entre la cognition et le monde de la technologie est celui de la **réalité virtuelle** et de la **réalité augmentée**. Ces techniques connaissent un développement considérable dans les différents usages (industriels, éducatifs et ludiques) qu'en fait la société, mais aussi dans le monde de la recherche. Les dispositifs de haute performance technologique mobilisent des compétences de différentes natures, dont celles faisant appel à l'analyse des aspects sensoriels et cognitifs des situations inédites créées par ces dispositifs. Un besoin ergonomique de grande ampleur se fait jour, non seulement dans la perspective du calibrage des interfaces ou de la mesure du mal du simulateur, mais sur les situations perceptives inédites créées par la réalité virtuelle, qui s'ajoutent au répertoire des situations naturelles et engendrent des processus cognitifs et des ajustements comportementaux nouveaux.

Ce sont autant de domaines dans lesquels la recherche française, notamment celle qui est développée dans les unités du CNRS, s'illustre spécialement, grâce aux opportunités d'inte-

reaction offertes par la composition d'un organisme qui est, par construction, pluridisciplinaire.

3.2 INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SCIENCES COGNITIVES

Retracer en quelques lignes l'histoire des rapports complexes entre l'intelligence artificielle (IA) et les sciences cognitives est impossible. On peut cependant rappeler que dans une première phase, les préoccupations de l'IA étaient très **cognitives**, mais que ses résultats, spectaculaires, n'étaient absolument pas généralisables. C'est pourquoi, dans une phase suivante, l'IA a pris un virage théorique afin de mieux expliquer les fondements de ses succès et de ses échecs, et de déterminer des **algorithmes efficaces** pour résoudre certains problèmes présumés requérir de l'intelligence, sans plus se soucier d'une éventuelle proximité avec les procédés par lesquels les sujets humains les résolvent.

Les tendances illustrées par ces deux phases perdurent au sein de l'IA, mais les développements les plus récents sont liés (a) à la possibilité d'accéder, grâce au Web, à une quantité d'information sans commune mesure avec ce qui était disponible auparavant et (b) à une demande accrue, de la part de nombreux acteurs du Web, d'incorporer de « l'intelligence » dans leurs applications. Les développements technologiques les plus récents (miniaturisation, mobilité, informatique distribuée) accentuent cette tendance.

De ce fait, certaines problématiques classiques de l'IA – comme la compréhension de la langue ou la représentation des connaissances – ont subi un changement radical, passant d'une description fine de quelques phénomènes circonscrits dans des domaines restreints, à des analyses nécessairement plus grossières de corpus considérables. L'objectif lui aussi s'est modifié, et loin de l'exigence de

correction et de complétude de sa « période logique » correspondant à une compréhension en profondeur, l'IA vise plutôt un résultat suffisamment robuste pour des applications de la vie courante.

Les liens théoriques entre IA et sciences cognitives persistent aux niveaux où ils se situent traditionnellement : dans les « grands classiques » de l'IA qui comportent une forte dimension cognitive (modélisation cognitive, robotique, apprentissage automatique, compréhension de la langue, etc.), et dans le débat philosophique et épistémologique sur la nature même de la cognition. Mais l'apparition de nouveaux domaines, comme la bio-informatique, et de nouvelles métaphores logicielles, comme les **systèmes multi-agents**, créent d'autres points de contact entre l'IA, les sciences du vivant et les sciences sociales. Mais les rapports entre IA et sciences cognitives tendent maintenant à se déplacer vers l'aval, vers une analyse des besoins humains permettant de savoir quel niveau de performance l'IA doit viser afin d'apporter une assistance efficace dans les tâches impliquant une forte composante cognitive.

La place de l'IA française continue à être honorable dans le paysage européen et mondial (on pourrait le vérifier en mesurant la proportion de contributions françaises dans les grandes conférences ou dans le comité éditorial des grandes revues par rapport à ce qu'elle était il y a 10 ou 20 ans). Il ne semble pas que l'on puisse déceler une véritable spécificité des recherches françaises en IA : certains sous-domaines y sont un peu mieux représentés, d'autres un peu moins bien. Les recherches sur la langue sont plutôt dans cette dernière catégorie, peut-être parce que l'effort des chercheurs français se partage entre des travaux sur la langue française et sur la langue anglaise... au point qu'un des meilleurs analyseurs lexicaux du français a été réalisé par des chercheurs allemands !

3.3 INTERACTIONS HOMME-MACHINE

Nous considérons ici le champ de recherche qui se développe autour des systèmes et des technologies de l'information et de la communication. Les chercheurs font porter l'essentiel de leur attention sur les processus qui président à la conception, à la construction et au fonctionnement de ces systèmes, ainsi qu'aux interactions que les humains réalisent avec eux. La perspective des sciences cognitives consiste à maintenir la cognition humaine dans la boucle informationnelle qui relie les humains et les artefacts. Deux enjeux majeurs s'ensuivent pour les chercheurs du domaine : créer des systèmes artificiels qui se comportent comme des agents cognitifs dotés de capacités rationnelles (computationnelles) ; faire porter par ces systèmes des représentations et des modes de traitement qui soient fonctionnellement compatibles avec ceux des opérateurs humains.

Le domaine de l'IHM ne se constitue pas en tant que « discipline » au sens strict, mais plutôt comme un ensemble de problèmes définissant un champ scientifique interdisciplinaire. Dans ce contexte, l'*ergonomie* est invitée à mettre en œuvre ses méthodes de conception et d'évaluation des logiciels et des interfaces. L'informatisation généralisée des activités professionnelles rend en effet indispensable les recherches sur l'ergonomie des logiciels, sur les aides logicielles à la réalisation de tâches, sur les aides à la décision dans le contrôle de processus. La nécessaire *modélisation de l'utilisateur* porte alors sur les activités de raisonnement, de diagnostic et de pronostic, de prise de décision et de planification (incluant la replanification). Enfin, le langage restant au centre de la plupart des dispositifs informatisés, il est important de mieux connaître l'impact des systèmes d'information électroniques sur la lecture, la compréhension, la recherche d'informations, le traitement d'informations multimédias (textes et images) ou multimodales (informations visuelles et auditives).

Une thématique en développement est celle des *interactions dialogiques* entre les agents humains (utilisateurs d'un dispositif) et des agents logiciels jouant le rôle d'assistants d'interface. La généralisation des systèmes distribués autour de l'Internet crée des besoins et pose des problèmes nouveaux aux spécialistes de l'IHM (cette dernière étant jusqu'ici surtout orientée vers le poste de travail). Un champ considérable s'ouvre ici en vue de créer des outils médiateurs permettant à des utilisateurs ordinaires d'accéder à des services en ligne, pour lesquels les assistants logiciels devront interagir de manière aussi naturelle que possible, ce qui impose de prendre en compte la dimension langagière, sociale et cognitive des interactions. Par exemple, des agents conversationnels animés viennent compléter l'interface usuelle, sous la forme de personnages virtuels produisant des signes non verbaux (dont on connaît le rôle important dans la communication humaine, comme le regard, le geste ou l'expression faciale).

L'IHM a également un rôle à jouer dans l'*assistance au travail collectif* et, plus généralement, aux *activités collectives* (« groupware »). La gestion des connaissances d'un collectif et la capitalisation des savoirs constituent des domaines importants, dans lesquels les chercheurs visent à clarifier le rôle des connaissances épisodiques, la traçabilité des décisions et de la logique de conception. D'un point de vue applicatif, ces questions renvoient à l'évaluation et à la spécification ergonomique des mécanismes de réutilisation développés en génie logiciel et en intelligence artificielle. Les capacités cognitives de focalisation, d'adaptation et de coopération sont également exploitables par les chercheurs en informatique dans la conception de systèmes à base d'agents.

3.4 ROBOTIQUE ET SCIENCES COGNITIVES

On peut identifier trois niveaux d'interactions entre la robotique et les sciences cognitives allant du simple intérêt pour une discipline lointaine (pas d'interaction) à la constitution d'une science de la cognition dont la robotique et les neurosciences computationnelles seraient deux des éléments majeurs. Entre les deux, les sciences cognitives et plus généralement les systèmes vivants constituent une source d'inspiration pour la robotique et, complémentairement, les robots sont des outils intéressants pour des expériences en psychologie ou en neurobiologie.

Le renouveau apporté par la robotique ces dernières années (en IA et en sciences cognitives) concerne l'importance de « l'embodiment » (« incarnation ») et permet de discuter d'un point de vue expérimental et formel des liens entre corps et cognition. Par exemple, la prise en compte de propriétés émergentes de la dynamique des interactions robot/environnement (souvent très difficiles à prédire) permet dans certains cas de simplifier et de rendre plus robustes les architectures de contrôle robotiques, mais aussi de proposer des solutions originales pour expliquer certains processus cognitifs (approche ascendante de la cognition). La **robotique** et les **neurosciences computationnelles** offrent ainsi un cadre unique pour faire coopérer des spécialistes en neurosciences, psychologie, physique, mathématiques et informatique en apportant de nouveaux moyens pour étudier les relations entre structures cérébrales et fonctions cognitives grâce à des modèles capables de contrôler des robots. Les expérimentations robotiques permettent de valider la cohérence d'un modèle et ses implications comportementales (ou dynamiques) pour ensuite proposer de meilleurs modèles et de nouvelles expériences en sciences cognitives.

La possibilité aujourd'hui de construire des **micro-robots** (et peut-être un jour des nano-robots) pose la question à la fois du

contrôle d'un robot isolé et du contrôle global d'une grande population de robots (intelligence collective ou « swarm intelligence »). Les contraintes liées à la faible puissance de calcul qui peut être embarquée dans ces robots a conduit naturellement les roboticiens à s'intéresser à l'éthologie et à proposer des algorithmes basés sur des notions d'**auto-organisation** permettant la résolution de problèmes complexes par une population d'agents élémentaires (par exemple, algorithmes reposant sur l'emploi de stratégies sensori-motrices simples au niveau individuel).

À l'autre extrême, on assiste à l'arrivée de **robots humanoïdes** et autres robots compagnons (chiens artificiels, robots expressifs), qui devraient un jour pouvoir assister des personnes à mobilité réduite ou amuser les enfants et les adultes. Cependant, même si la mécanique et le contrôle bas niveau de ces robots étaient entièrement satisfaisants, un grand nombre de travaux resterait à faire pour procurer à ces systèmes un « cerveau » capable de les contrôler et de leur donner des moyens intuitifs, efficaces et acceptables pour interagir avec des humains (modèles de l'attention conjointe, capacité à afficher un état « émotionnel », capacité à prendre son tour dans une interaction). Les problèmes d'ingénierie rejoignent plusieurs grandes questions des sciences cognitives et sont directement liés à la très haute intégration de ces robots. La diversité de leur capacité d'action et de perception rend possible le test de modèles cognitifs complexes. Mais malgré les percées récentes dans la compréhension du cerveau et des dynamiques neuronales sous-jacentes, la compréhension de ces mécanismes cognitifs continue d'être un fantastique défi en partie à cause de l'énorme quantité d'informations qui doivent être incluses dans ces systèmes.

Ces travaux se retrouvent dans la **robotique épigénétique** qui essaie de combiner les sciences du développement, les neurosciences, la biologie, la robotique cognitive et l'intelligence artificielle. L'une des questions fondamentales est de comprendre comment des structures cognitives complexes émergent des interactions d'un système « incarné » avec

un environnement physique et social. La robotique épigénétique ou développementale inclut le double but de comprendre des systèmes biologiques par une intégration pluridisciplinaire entre sciences sociales et sciences de l'ingénieur et, simultanément, de permettre à des robots et autres systèmes artificiels de développer des capacités d'apprentissage et d'adaptation à des environnements très divers au lieu de devoir programmer une solution pour chaque comportement désiré (solution souvent limitée, de plus, à un environnement donné).

La communauté française est présente dans ces différents domaines, mais avec des équipes souvent trop isolées et un manque de moyens pour aborder les défis que pose cette nouvelle robotique. Malgré une volonté affichée dans certains appels d'offres de l'ANR, on ne retrouve que très peu de travaux réellement pluridisciplinaires impliquant à niveau égal la robotique et les sciences cognitives (l'un servant trop souvent d'alibi à l'autre).

4 – LES SCIENCES COGNITIVES VUES DEPUIS LES SCIENCES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES

Bien que relativement peu de physiciens et de mathématiciens en France travaillent sur des thématiques relevant des sciences cognitives, il existe néanmoins une communauté active et reconnue internationalement, avec une tradition déjà ancienne (en physique, essentiellement depuis le milieu des années quatre-vingts pour ce qui est de la modélisation), avec une reconnaissance de ces thématiques par les commissions disciplinaires (ainsi, la section 02 inclut « cognisciences » dans la liste de ses mots-clés). On constate aussi dans les années récentes, aussi bien en France qu'à l'étranger, une augmentation de l'intérêt des mathématiciens pour ce domaine et un flux

régulier de physiciens et mathématiciens rejoignant des laboratoires interdisciplinaires ou relevant d'une autre discipline que la leur (en général, la biologie). La formation par la physique (expérimentale ou théorique) ou par les mathématiques, sur des sujets à l'interface avec d'autres disciplines, est assurément l'un des éléments-clés du succès de l'apport de ces disciplines.

4.1 SCIENCES PHYSIQUES ET SCIENCES COGNITIVES

La physique est avant tout une discipline expérimentale. Elle fournit des outils aux autres disciplines. Parmi ceux devenus essentiels en sciences cognitives, on peut citer les techniques d'IRM, l'imagerie photonique ou des techniques encore plus récentes et très prometteuses de suivi optique de molécules uniques, permettant par exemple l'étude de la dynamique des neuro-récepteurs lors du développement du système nerveux. Dans ces cas de nouvelles techniques, les expériences sont le plus souvent le fait de collaborations entre physiciens et biologistes. En fait, la *biophysique* expérimentale est en plein essor, avec certaines composantes orientées sciences cognitives, comme par exemple l'étude des bases physiques de systèmes sensoriels. Ces expériences conçues selon une approche physique abordent des questions sous un angle différent de ce qui se pratique dans un laboratoire de biologie et conduisent à développer des techniques expérimentales plus « naturelles », destinées à être mises en œuvre dans le cadre d'un laboratoire de physique (par exemple, la conception de capteurs de type « MEMS », Micro-Electro-Mechanical Systems).

Mais la physique ne s'intéresse aux expériences qu'à travers un cadre conceptuel et théorique et elle développe pour cela des *outils conceptuels* et des *approches analytiques et numériques*. Ceux-ci, relevant en particulier de la physique théorique, de la phy-

sique statistique, de la physique des systèmes dynamiques non linéaires, ont fait leur preuve également dans le domaine des sciences cognitives, par des apports significatifs dans le domaine de la **modélisation**. Dans ce domaine, les frontières sont souvent floues avec les mathématiques appliquées (probabilités, systèmes dynamiques) ou avec l'informatique (lorsqu'il s'agit de simulations numériques, dites « multi-agents » en informatique, ou de développements algorithmiques, comme les algorithmes d'apprentissage, par exemple).

La modélisation des physiciens s'attaque à diverses échelles – de la biophysique de la synapse ou du neurone à la dynamique de réseaux – et avec une gamme de modèles de complexité plus ou moins grande, cherchant un compromis entre description « réaliste » et système analysable mathématiquement. Ces travaux concernent, d'une part, l'analyse des **dynamiques** possibles (oscillations, bursts) résultant des propriétés biophysiques et, d'autre part, la modélisation du **traitement de l'information** (fonction de mémoire, modes d'apprentissage, codage). La physique s'intéresse souvent au **passage d'une échelle à l'autre** (ce qui est la spécificité de la physique statistique), par exemple pour expliquer le comportement global d'un réseau ou d'une fonction (par exemple, une fonction de mémoire) à un niveau intégré, à partir des propriétés des neurones composant le réseau. Ces travaux s'attachent, d'une part, à dégager des « propriétés génériques » (décrire dans un espace de paramètres les différents types de comportements auxquels on peut s'attendre) et, d'autre part, à analyser des systèmes spécifiques (hippocampe, cervelet, rétine).

Pour le physicien, il y a un continuum entre les aspects purement biophysiques et ceux relevant plus spécifiquement des sciences cognitives. Ainsi, comprendre l'éventuelle fonction cognitive de synchronies ou d'oscillations demande, entre autres choses, d'analyser, sans a priori sur cette fonction, les conditions pour lesquelles un ensemble de neurones peut avoir ce type d'activité collective. L'étude de telles propriétés dynamiques des réseaux est

actuellement un thème particulièrement actif. Un autre domaine essentiel est celui de l'interprétation de l'activité neuronale en tant que « code » (quelle information est portée par l'activité neuronale?). Ce thème ancien est renouvelé par la conjonction des progrès dans l'enregistrement d'activités neuronales et les progrès théoriques dans l'analyse du codage, au niveau du neurone individuel et surtout d'un ensemble de neurones, dans un cadre statistique. La physique statistique, partageant avec la théorie de l'information les mêmes concepts fondamentaux concernant l'inférence statistique (cadre bayésien), est un acteur important de cette dynamique.

Une autre composante prometteuse est la modélisation à l'interface cognition/systèmes complexes en SHS. De manière générale, les outils issus de la physique permettent d'analyser l'évolution comportementale d'une population en fonction des capacités d'apprentissage et d'adaptation des individus. Ceci concerne les domaines de la cognition sociale, de l'économie cognitive, mais aussi par exemple de la psycho/socio-linguistique (émergence et évolution de la langue). Les développements spectaculaires des approches expérimentales (« behavioral game theory », économie expérimentale, neuro-économie) doivent permettre une modélisation prenant en compte des caractéristiques réalistes du comportement individuel.

4.2 MATHÉMATIQUES ET SCIENCES COGNITIVES

Le progrès des sciences cognitives est pour une large part tributaire de la place croissante qu'y tiennent les méthodes mathématiques de **modélisation** et les techniques de **simulation informatique**. Il ne s'agit pas seulement des outils mathématiques que l'on trouve dans toutes les disciplines pour analyser les données (probabilités et outils statistiques, analyse en composantes principales, transformée de Fourier, etc.). Il s'agit aussi de structures mathéma-

tiques 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 de la discipline ou encore d'aborder le problème de leur enseignement. Enfin, de plus en plus de problèmes mathématiques originaux naissent au sein des neurosciences et vont à coup sûr provoquer l'apparition de théories nouvelles. Pour toutes ces interactions, les disciplines de la cognition peuvent compter en France sur une communauté mathématique dynamique et variée. Cependant, même si des travaux remarquables sont déjà accomplis, il reste encore beaucoup à faire pour impliquer davantage les mathématiciens.

Bien que leur essence réside dans les démonstrations et dans la production d'algorithmes et de calculs, les mathématiques se nourrissent de questions qui ont leur origine dans les *autres sciences*. On connaît les grands apports des mathématiques aux neurosciences, notamment à travers l'équation d'Hodgkin-Huxley et les systèmes non linéaires qui en sont dérivés. Cette équation demeure fondamentale pour les modèles de neurones, même si elle nécessite encore des aménagements (comme ceux que propose la théorie des bifurcations de systèmes dynamiques). Cette direction est toujours très active, par exemple avec la théorie des modèles canoniques. Elle est appelée à se développer encore, par exemple avec les familles universelles de bifurcations à plusieurs paramètres. Pour sa part, 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.). Le paradigme demeure la théorie de l'information de Shannon, tout en étant parfois complété par des mesures de complexité algorithmique. Enfin, venant de la physique statistique, les réseaux de Hopfield sont une autre référence. Il reste cependant encore beaucoup à faire du point de vue plus proprement mathématique

que physique. Ainsi, la théorie des systèmes monotones devrait inspirer davantage de recherches. La théorie des processus stochastiques intervient également, mais c'est encore peu par rapport à ce qu'elle est en mesure d'apporter dès maintenant.

Pratiquement, toutes les mathématiques appliquées se retrouvent quelque part dans le domaine des *sciences du cerveau*. Dans certains secteurs, la recherche mathématique a clairement rejoint la recherche en neurosciences. Les domaines les plus actifs (en France comme ailleurs) 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'école d'analyse harmonique, à travers la théorie du signal (ondelettes), les équations aux dérivées partielles (filtrage échelle-espace, équations de diffusion non linéaires, géométrie multi-échelle, modèles variationnels), la géométrie différentielle classique et la topologie. Sans doute les structures à mettre en jeu pour comprendre la dynamique cérébrale ne sont-elles pas encore toutes exactement formulées. Il est vrai qu'elles ne sont pas faciles à anticiper, dans la mesure où le cerveau fonctionne à plusieurs niveaux, du plus dynamique et du plus concret jusqu'au plus abstrait. En outre, ces niveaux sont le plus souvent couplés et mêlent les échelles. Il sera probablement important de marier des structures connues d'algèbre et d'analyse, de géométrie et de probabilités, mais aussi d'en inventer d'autres. Les notions d'invariance, d'ambiguïté et de variabilité, dont les mathématiciens ont déjà abondamment traité, sont certainement d'un intérêt général pour les sciences cognitives.

Les échanges des mathématiques et des sciences cognitives sont également capables d'offrir une nouvelle compréhension des mathématiques. En particulier, de nouveaux points de vue peuvent émerger sur la question des *fondations des mathématiques*. Cette question des fondations a inspiré de grands

mathématiciens dans des directions différentes (Poincaré et Einstein, mais aussi Leibniz et Hilbert). Il existe une tradition qui mérite d'être poursuivie sur l'intuition et la construction de l'espace et du temps, faisant appel à la fois aux notions physiques et aux concepts psychologiques. Quel est le rapport entre l'espace représentatif et l'espace des actions? Y a-t-il un ordre d'apparition des géométries au cours du développement de l'enfant? Doit-on voir l'origine de la géométrie dans les variétés d'oscillations ou bien dans le mouvement et les références spatiales nécessaires à l'intégration multisensorielle? Plus généralement, la question posée est celle de l'origine sensible des mathématiques, comme le font apparaître les réflexions de R. Thom sur la forme et l'information et sur la sémiophysique. La question de la nature des objets communs reste un problème multidisciplinaire qui concerne les mathématiques. Enfin, les nombres et les figures, leur perception et les opérations qu'ils supportent, constituent un immense champ de recherche en sciences cognitives, notamment à travers leurs implications pour l'enseignement des mathématiques.

5 – LE RÔLE MAJEUR DU CNRS DANS LE SOUTIEN AUX SCIENCES COGNITIVES

Les lieux d'où émergent les questions – nouvelles ou classiques – relevant des sciences cognitives sont multiples : sciences du vivant, sciences humaines et sociales, sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie, sciences physiques et mathématiques. Chaque lieu d'émergence exprime des besoins d'interaction et établit des partenariats intellectuels et stratégiques qui illustrent les capacités d'interdisciplinarité présentes au sein de chacune des disciplines.

Le cadre institutionnel le plus facilitateur pour l'interdisciplinarité est évidemment un

organisme où une pluralité de disciplines est déjà assurée. C'est le cas du CNRS (sans que ceci minimise la valeur des contacts que l'organisme entretient à l'extérieur, avec les autres EPST et les établissements d'enseignement supérieur et de recherche). Parmi les domaines interdisciplinaires dont le CNRS fournit les acteurs, les sciences cognitives constituent un domaine particulièrement important. Non seulement le CNRS héberge les différentes formes de collaboration interdisciplinaire en sciences cognitives, mais il a été *pionnier* en la matière. La première grande initiative de soutien aux sciences cognitives a été mise en œuvre par le CNRS sous la forme du PIR Cognisciences. Cette opération a contribué significativement à installer la recherche cognitive comme un des axes interdisciplinaires remarquables du CNRS. Le CNRS a continué de s'impliquer lorsque le relais des initiatives a été pris par d'autres opérateurs (GIS Sciences de la Cognition, ACI Cognitive). Parallèlement à ces grands programmes, le CNRS a été particulièrement proactif en lançant au moins quatre Programmes Interdisciplinaires plus thématiques permettant à toutes ses communautés – SDV, SHS, STIC (puis ST2I et MPPU) – de soutenir les efforts des chercheurs en sciences cognitives.

L'opération la plus récente, lancée par le CNRS à partir de l'initiative de trois Sections du Comité National, a été la création d'une *Commission Interdisciplinaire* entièrement dédiée au recrutement de chercheurs situés aux interfaces dans le domaine de la cognition (la CID 45). À la différence des sections, la CID n'a pas en charge le suivi d'un domaine et d'une communauté stable de chercheurs dans un périmètre prédéfini de laboratoires. Elle œuvre à l'étape sensible du *recrutement des jeunes chercheurs* possédant une double formation et des *jeunes cadres* en charge d'une opération structurante. Elle s'appuie sur un ensemble d'expertises croisées et fonctionne comme l'*observatoire d'une communauté et d'un champ scientifique* qui sont, en fait, en construction permanente. Ce rôle est illustré, en particulier, par la confection du présent rapport, ainsi que la contribution de la CID 45 au Plan Stratégique du CNRS (30 septembre 2006). Une autre concrétisation

importante de l'implication du CNRS est la création en 2002 d'une UMS, le **Relais d'Information sur les Sciences de la Cognition (RISC)**, qui assure une fonction de diffusion de l'information sur les sciences cognitives et joue un rôle important dans le développement de la coopération entre équipes et entre champs disciplinaires.

Le rôle spécifique du CNRS dans le développement des sciences cognitives et la bonne tenue des unités CNRS en sciences cognitives au plan national, européen et international justifient que l'organisme investisse dans des structures et des outils qui permettent la **poursuite de cet effort**. Cet effort, qui passe certainement par une concertation avec l'ANR, doit se traduire par une stratégie scientifique incluant des Programmes Interdisciplinaires propres, des structures fédératives (de type « Groupements de Recherche Interdisciplinaires »), la création « d'Unités de Recherche Interdisciplinaires » (préconisées dans le rapport de D. Le Quéau, « Promouvoir l'Interdisciplinarité au CNRS ») et, assurément, l'inscription dans la durée de la mission de la CID 45, qui est une **mission permanente**.

La communauté des chercheurs CNRS qui contribuent à un ou plusieurs volets des sciences de la cognition est aujourd'hui de l'ordre de 600. Un inventaire des formations relevant des sections 07, 27, 34 et 35 qui accueillent des chercheurs engagés dans l'interdisciplinarité sur le thème des sciences cognitives montre que leur nombre atteint 80. En outre, si l'on considère l'amont, tout au moins en France, il existe 199 formations universitaires liées aux sciences cognitives, dont 4 leur sont entièrement dédiées sur le cycle complet LMD. Il existe donc un **potentiel humain** considérable, pour qui l'existence d'une CID est un signal fort. L'existence d'une CID consacrée aux sciences cognitives est un message significatif à l'intention d'une communauté de jeunes chercheurs qui sont incités à développer une vraie stratégie interdisciplinaire et qui sont prêts à faire le pari difficile et risqué de la double, voire de la triple formation. Evidemment, le CNRS attend des jeunes chercheurs un niveau scientifique élevé. Dans

le paysage actuel, où la compétition est intense (depuis 2005, le nombre moyen de candidats par poste ouvert en CID 45 s'élève à 16 pour les CR et 13 pour les DR), il n'y a pas de raison de douter de la qualité des chercheurs en sciences cognitives recrutés au CNRS sur profil interdisciplinaire.

Un autre aspect du potentiel humain concernant le CNRS est le rôle des ITA dans la recherche et l'évolution des métiers, en particulier ceux des IR et des IE dans le domaine des sciences cognitives. Il s'agit d'un enjeu important pour la conception de la recherche en général. Dans le domaine qui nous occupe, les développements informatiques de toutes sortes (réalité virtuelle, prothèses cognitives, informatique pour l'imagerie, neuroinformatique, etc.) requièrent des compétences nouvelles, sans commune mesure avec les besoins qui existaient dans les premières années des sciences cognitives. Les IR et le IE tendent à être, en général, davantage impliqués qu'auparavant dans le questionnement scientifique. En outre, le besoin en formation, pour l'ensemble de la communauté, est très important. La constitution de « réseaux métiers » pour la cognition devrait permettre de former, de souder et de dynamiser cette communauté. Les besoins qui s'expriment commencent à recevoir des réponses (par exemple, à travers la création d'un répertoire des compétences et savoir-faire en sciences cognitives par l'UMS RISC). La valorisation des réalisations techniques des ITA, qui est souvent trop faible, devrait tirer profit de nouvelles initiatives, comme la mise en place d'une cellule du CNRS chargée d'aller chercher l'innovation au cœur de ses propres laboratoires.

Ce rapport résulte d'un travail effectué par les membres de la CID 45 (« *Cognition, Langage, Traitement de l'Information : Systèmes Naturels et Artificiels* ») en réponse à la demande du Conseil Scientifique du CNRS. Le travail a été mené avec la participation de Jean Lorenceau, directeur du Relais d'Information sur les Sciences de la Cognition (UMS 2551) et les contributions rédactionnelles de Daniel Bennequin, Christophe Coupé, Colette Fabri-

goule, Bernard Fradin, Line Garnero, Philippe Gaussier, Benoît Habert, Denis Hilton, Pascal Hugué, Daniel Kayser, Jean-Paul Lacharme, Guillaume Masson, Jean-Pierre Nadal, Jean-

Luc Nespoulous, Elisabeth Pacherie, François Pellegrino, Jean Petitot, Joëlle Proust, François Rigalleau, Jean-Luc Schwartz, Simon Thorpe et Nicolas Vibert.

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 46

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTÉ

Présidente de la CID

Martine HOSSAERT-MCKEY

Membres de la CID

Jean-Claude ANDRÉ

Pascale BAUDA

Jean-Yves BOTTERO

Marie CORNU

Pierre GARMY

Janine GIBERT

Claude GILBERT

Michel GRÉGOIRE

Jacky HIRSCH

André LACROIX

Pierre LASCOUMES

Geneviève MICHON

Frédéric OGÉ

Raphaël ROMI

Céline ROZENBLAT

Léna SANDERS

Richard SEMPÈRE

Tarik TAZDAÏT

Anne TRESSET

Marie-Madeleine USSELMANN

MOTS CLÉS DE LA CID 46 :

– risques naturels et environnementaux : évaluation des risques, impacts socio-économiques, perception des risques par la population, adaptation de l'homme aux changements environnementaux, élaboration de techniques de prévention, évaluation socio-économique et acceptabilité des risques, politique publique, écologie de la conservation ;

– applications relatives aux risques environnementaux résultant des changements climatiques, du changement d'utilisation des terres, de la pollution des milieux naturels et des actions sur la biodiversité.

La CID 46 « *Risques environnementaux et société* » a pris la suite, à partir de 2005, d'une première commission interdisciplinaire œuvrant sur des thématiques proches, intitulée « *Environnement continental: logiques et fonctionnements des écosystèmes* ». Celle-ci, à l'instar des autres CID, n'apparaît pas spécifiquement dans le Rapport de conjoncture du Comité national de la recherche scientifique, édité par le CNRS en 2004. Cependant le texte « Environnement, risques, sécurité » de l'axe « Environnement, énergie et développement durable » figurant dans le volume 2 du rapport général (p. 117 sqq.) est suffisamment explicite et développé pour nous dispenser de revenir longuement ici sur les attendus épistémologiques généraux des problématiques de la CID. C'est pourquoi on trouvera uniquement

dans ce qui suit quelques considérations pragmatiques issues d'une expérience de deux années de fonctionnement de la commission interdisciplinaire (2005 & 2006) et nourries d'un séminaire de réflexion des membres de la CID, tenu à Montpellier en juin 2006.

La grande originalité de la CID 46 est de mélanger deux communautés, celle des sciences humaines et sociales (SHS) et celle, dite des sciences « dures » (SDV et SDU) pour promouvoir de nouveaux champs de recherche intégrant les deux domaines.

1 – LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

- Les trois mots clés du titre de la CID en fixent clairement le programme et les limites. Il s'agit bien de prendre en considération le risque (que l'on définit de manière très générale comme le croisement d'un aléa et d'une variable sociale, considérée en termes de vulnérabilité) dans ses dimensions environnementales (ce qui exclut par exemple certains risques d'ordre strictement technologique) et en regard de groupes humains en société. Les principales notions à prendre en compte sont donc celles de vulnérabilité, de représentation et de perception du danger, de mémoire du risque, de politiques de gestion et de réparation, de comportements face au risque et enfin d'évolution dans le temps du risque objectif lui-même et aussi du concept du risque en fonction des cultures et des sociétés. Alors que dans un premier temps, la notion de risque avait pu paraître réductrice dans le domaine environnemental, il apparaît au contraire qu'elle est un déterminant majeur de la spécificité de la CID 46, le risque pouvant difficilement trouver d'ancrage scientifique valide dans le champ des sections monodisciplinaires du Comité national. On n'ergotera pas sur le libellé du titre de la commission qui en l'état a le mérite de la clarté. Les membres de la CID aimeraient cependant que le

mot « sociétés » soit orthographié avec un pluriel pour mettre en exergue la relativité temporelle et spatiale de l'appréhension du risque dans l'environnement. On pourrait en outre songer à une déclinaison du type « Aléas, vulnérabilités, environnements et sociétés » dont l'avantage serait une explicitation de la notion de risque, même si elle n'est problématique que dans son acception courante et non dans le domaine scientifique.

La finalité déclarée des CID étant de favoriser l'émergence de nouveaux champs de recherche à l'intersection de plusieurs compétences disciplinaires, il s'avère dans les faits que la CID 46 répond effectivement bien à cette double exigence. En témoignent le nombre, la diversité et la qualité des candidatures qu'elle a eu à examiner en deux ans. Le vivier scientifique existe et il est généralement d'un excellent niveau, les problématiques portées par la CID demeurent d'une totale acuité et d'une pertinence très actuelle, aucune section traditionnelle du CN ne semblant capable de se substituer à elle dans l'état de l'art présent.

- Ainsi, le champ thématique de la CID 46 est globalement articulé sur le fonctionnement des écosystèmes et leur évolution et les risques environnementaux associés. On entend par écosystèmes les hydrosystèmes et les écosystèmes marins et terrestres, en intégrant dans ceux-ci la composante anthropique exprimée au travers tant des « pressions » ou usages que de la valorisation des ressources (on parlera d'anthropo-éco-systèmes), mais aussi la composante historique via les approches « paléos » qui permettent de contraindre les modèles actualistes de l'évolution du climat et des environnements et de considérer les phénomènes étudiés dans la longue durée.

Par ailleurs, la stratégie de recherche peut/doit aussi être tournée vers l'action en visant à fournir les fondements d'une « ingénierie environnementale » pour développer une recherche finalisée tant vers l'action publique que le développement économique.

1.1 DES APPROCHES COMBINÉES

Le fonctionnement écosystémique et sa dynamique

Une approche «écosystémique» doit en particulier s'intéresser à la dimension temporelle, tant au regard de la dimension «historique» (paléo-écologie) que «prospective» (changement global et production agronomique ou évolution climatique et environnementale).

L'approche économique et sociale

On peut structurer ces interactions en quatre grandes questions classiques :

– a) en quoi l'activité économique de la production (de biens et de services) participe-t-elle à la modification des écosystèmes, des paysages et du climat? Quels risques crée-t-elle pour l'environnement naturel? Quels sont les décisions et modes d'organisation des entreprises et des pouvoirs publics qui peuvent accroître ou réduire ces risques?

– b) en quoi les différentes sociétés, du fait de leur histoire et de leurs savoirs répondent-elles différemment aux transformations de leur milieu et de leurs ressources?

– c) en quoi les modifications des écosystèmes, des paysages et du climat influencent-elles en retour le cours des activités économiques? Quels risques courent ces activités économiques du fait de ces modifications? Quelles modifications engendrent les risques les plus forts et quels modes d'organisation et de décision adoptent les entreprises et les pouvoirs publics pour s'en prémunir?

– d) en quoi le savoir produit par les études scientifiques sur les modifications et altérations des écosystèmes contribue-t-il à la création de nouveaux secteurs économiques? Quelle valorisation économique donner aux travaux scientifiques?

L'approche par les risques

L'introduction d'une dimension «risques» dans l'approche des sujets est intéressante du point de vue heuristique. Cette approche, associée au fait que le fonctionnement des écosystèmes doit intégrer une dimension économique et sociale, conduit à systématiser une approche par aléa et vulnérabilité.

L'approche qui considère les risques «naturels» (ceux-ci pouvant être définis comme «causés» par la nature) et les risques «environnementaux» (ceux-là pouvant être «subis» par la nature) semble en effet trop réductrice.

La notion d'aléa et de vulnérabilité analysée au travers du fonctionnement des écosystèmes, avec prise en compte d'une dimension économique et sociale, est en effet plus fructueuse pour comprendre les processus en cause. Elle doit permettre également d'explicitier, notamment dans le cadre d'une approche prospective liée au changement global, les phénomènes d'irréversibilité (en utilisant le concept de résilience) notamment par la mise au point d'indicateurs adaptés.

La mobilisation des démarches interdisciplinaires peut aussi s'avérer utile et féconde pour les situations d'incertitude dans lesquelles le risque n'est pas encore pleinement caractérisé (OGM, produits chimiques, nanotechnologies, etc.). Elles participent alors aux démarches de précaution.

L'approche par les risques sera en particulier systématique pour les sujets concernant :

– les changements globaux avec notamment les conséquences de l'effet de serre et de la fragmentation des paysages ;

– les séismes, mouvements gravitaires, tsunamis, etc. ;

– les crues (inondation) et flux associés (érosion). La dégradation des sols par l'érosion constitue un axe important (en particulier en milieux méditerranéens), ainsi que les aménagements hydrauliques associés (leurs effets sur les crues et les milieux aquatiques, et les conséquences de leur état et de leur gestion) ;

– les contaminations chroniques et/ou accidentelles des sols et des milieux aquatiques par les pratiques humaines (produits chimiques, déchets et leur transformation en matériaux secondaires), la santé des plantes ;

– la santé humaine via la chaîne trophique mais aussi via la dégradation de notre environnement (air, eau) liée aux développements de produits ou de technologies et le contact direct avec l'homme ou encore via l'émergence – ou la réémergence – de maladies liées aux modifications environnementales ;

– les invasions biologiques liées à l'activité et aux déplacements humains ;

– d'autres (épuisement des grands aquifères, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.).

Ces approches combinées doivent permettre de traiter la délicate question du compromis entre la minimisation des risques encourus par les – ou du fait des – activités économiques et le maintien des fonctions naturelles assurées par les écosystèmes et garantes de la biodiversité (notion de développement durable).

1.2 UNE ÉCHELLE APPROPRIÉE

L'échelle à laquelle les sujets doivent être abordés de façon privilégiée est la « méso-échelle » (i.e. l'échelle des territoires).

C'est l'échelle des processus écosystémiques et de l'action économique et sociale. C'est aussi l'échelle de l'écologie des paysages.

Cependant, cette méso-échelle doit pouvoir être dépassée, et ceci en particulier dans deux cas :

– la prise en compte du « changement global » qui, dans sa dimension climatique en particulier, peut mobiliser des « boucles de fonctionnement » qui vont au-delà des territoires et que l'on abordera au moyen des

outils « paléos » ou historiques, ou prospectifs, correspondant alors à une échelle plus large ;

– l'axe « écotoxicologie » : au travers de la chaîne trophique ou du contact direct avec des contaminants, les processus de transfert mettent en jeu, aussi bien dans le milieu que chez l'homme, des mécanismes analysables et conceptualisables à micro et nano-échelle (échelle cellulaire, voire moléculaire).

2 – LES MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION À MOBILISER

2.1 CADRES DE L'INTERDISCIPLINARITÉ

Les sections concernées par la CID sont les sections 19 et 20 (SDU), 29 (SDV), 31, 37, 39 et 40 (SHS). Suivant la nouvelle nomenclature et la nouvelle organisation des départements scientifiques, ceux directement en relation avec les activités de la CID sont : MPPU (Planète et Univers), Sciences du vivant, SHS, EDD et Ingénierie. Au-delà des rapports entretenus avec les sections des autres départements, le lien fort avec le département EDD, apparu postérieurement à la CID, est naturel en raison même de l'interface très large qui existe entre les préoccupations de la CID et les compétences du département, sans que, pour autant, celles-ci soient réductibles les unes aux autres. Telle quelle, la couverture disciplinaire au sein de la CID apparaît satisfaisante et permet de faire face à toutes les situations sans recours à des expertises extérieures. On peut cependant suggérer d'associer à l'avenir la section 13 (Physicochimie : molécules, milieux), la section 18, les deux sections historiques 32 et 33 du département SHS, tant il est vrai que beaucoup des problématiques de la CID ne peuvent s'analyser utilement que dans le temps long, et enfin la section 36.

2.2 ÉVALUATION

Comme les autres CID, la CID 46 n'est pas une section du Comité national de plein exercice. Lui est dévolu uniquement le recrutement de chercheurs sur les thématiques interdisciplinaires qui lui sont propres, mais elle n'assure l'évaluation ni de chercheurs en poste, même pas ceux qu'elle a contribué à recruter, ni de laboratoires. Ces restrictions importantes dans le domaine des compétences possibles des CID n'est pas sans créer de difficultés. Les chercheurs recrutés sur des postes dont l'énoncé et le champ sont, par définition, interdisciplinaires se retrouvent aussitôt après leur intégration dans une logique de carrière scientifique et d'évaluation qui rentrent *de facto* dans les compétences d'une section monodisciplinaire. Parallèlement, les laboratoires dont la démarche se situe franchement dans la ligne interdisciplinaire des thématiques des CID sont astreints, selon la règle de droit commun, à une évaluation de leur activité par une ou plusieurs sections du CN mais sont privés de l'apport d'une vision interdisciplinaire.

Pratiquement la solution envisageable pourrait être celle de la co-évaluation entre la – ou les – section(s) de rattachement des chercheurs et des laboratoires (ou des équipes) et la CID selon le principe du libre choix des intéressés. L'alourdissement des tâches pour les CID, engendré par la mesure qui conduirait à organiser une véritable session d'automne et les visites de laboratoires correspondantes, serait largement compensé par le gain en pertinence scientifique dans le suivi à long terme des chercheurs et des laboratoires. Juridiquement, le dispositif ne fait aucune difficulté dans la mesure où il est explicitement visé dans l'article 4 de l'arrêté du 12 novembre 2004 portant création des CID au CNRS. « En application des dispositions prévues à l'article 24 du décret du 24 novembre 1982 susvisé, ces commissions exercent, dans leur domaine d'activité, les compétences dévolues aux sections du Comité national de la recherche scientifique, notamment en matière d'analyse de la conjoncture scientifique et de ses perspectives.

Elles exercent toutes les compétences dévolues aux dites sections par les statuts du personnel du Centre national de la recherche scientifique, notamment en matière d'évaluation. Elles peuvent être consultées sur toutes questions relevant de leur domaine, notamment lors de l'évaluation des unités de recherche. ».

2.3 UNE ÉCOLE D'ÉTÉ ?

Les membres de la CID proposent, dans un délai de deux ans c'est-à-dire avant l'expiration de leur mandat actuel, l'organisation d'une École thématique dans le cadre des « Entretiens de Cargèse » destinée à approfondir la thématique qui leur paraît centrale : Comment se pose la question du risque dans le cadre de l'interaction homme – milieu, sociétés – environnements, traitée dans l'interdisciplinarité à échelles multiples d'espace et de temps ? Il conviendrait en effet de s'interroger au fond sur le régime des connaissances et des recherches dans le champ, d'examiner la nature et les modalités des transmissions entre scientifiques et publics (décideurs, gestionnaires et grand public) qui se font pour l'heure apparemment assez mal.

2.4 HISTORIQUE DES POSTES ET DES RECRUTEMENTS SUR DEUX ANS

- Depuis sa création en 2005, la CID 46 a procédé à deux campagnes de recrutement pour un total de 11 postes ouverts aux concours.

DR 2

2005 : 2 postes ouverts sur les thèmes relevant de la CID 46 (46/01) ;

2006 : 0 poste.

CR1

2005 : 2 postes fléchés [*Quantification et gestion des risques environnementaux* (46/02) – *Aspects ethnobiologiques et/ou ethnoécologiques de la conservation de la biodiversité*, affecté à un laboratoire SDV (46/03)];

2006 : 1 poste colorisé [*Environnement, vulnérabilités territoriales et santé* (46/01)].

CR2

2005 : 3 postes fléchés [*Spéciation et métabolisme des métaux et environnement*, affecté à un laboratoire Chimie (46/04) – *Impacts socio-économiques du changement climatique* (46/05) – *Évaluation des vulnérabilités sociales et territoriales dans la gestion des risques environnementaux* (46/06)];

2006 : 2 postes fléchés [*Économie et sociologie des changements climatiques*, affecté à un laboratoire de l'IPSL (46/03) – *Économétrie, économétrie spatiale*, affecté au laboratoire SPE à Corte (46/04)],

1 poste colorisé (46/02) (*Production primaire dans les écosystèmes littoraux anthropisés – Paléo-environnements et hominidés*).

Du bilan ressortent les éléments principaux suivants :

- postes banalisés : 2 ;

- postes colorisés : 2 ;

- postes fléchés : 7 dont 2 non pourvus à la suite de concours infructueux (46/05 en 2005 et 46/04 en 2006) soit 29 % de perte.

- Les chiffres parlent d'eux-mêmes et l'on comprendra aisément que la CID 46, en raison de l'expérience qu'elle a acquise désormais, se prononce sur plusieurs orientations pour l'avenir qui lui semblent stratégiques :

- il est de la plus haute importance, pour installer la pratique interdisciplinaire dans la durée, que l'on recrute non seulement de jeunes chercheurs au niveau CR mais aussi des scientifiques expérimentés et reconnus internationalement en prévoyant un volant suffisant de postes ouverts au concours de directeur de recherche. À cet égard, l'absence en

2006 de postes dans cette catégorie est lourdement contreproductive, pour le champ interdisciplinaire bien sûr mais aussi et surtout par le message négatif qu'on envoie ainsi aux jeunes chercheurs attirés par une démarche interdisciplinaire sur leur avenir à longue échéance ;

- le coloriage des postes permet à la fois au CNRS d'affirmer une politique scientifique forte mais pragmatique qui affiche des intentions et des orientations à court et moyen terme mais tient compte du potentiel humain existant à un moment donné. Le coloriage sur un profil, pour prendre tout son sens, devrait être maintenu sur plusieurs exercices budgétaires jusqu'au recrutement effectif, au meilleur niveau ;

- tous les postes ouverts aux concours ne peuvent pas être colorisés. Une proportion de 50 % maximum semble raisonnable : elle prend effectivement en compte la nécessité d'une politique volontariste de recrutement sur des thématiques considérées comme prioritaires sans pour autant y enfermer toute la jeune recherche interdisciplinaire et laisse une part significative à des propositions spontanées sur des sujets émergents qui auraient autrement beaucoup de difficulté à s'imposer ;

- *a contrario*, le fléchage des postes présente une quantité d'inconvénients qui devraient être dirimants. La seule vertu qu'on puisse lui attribuer éventuellement est parfaitement identique à celle du coloriage dans l'affirmation d'un plan programmé de recrutement. En revanche, il conduit, dans une proportion déraisonnable de cas, à ne pas pourvoir les postes mis au concours ou bien à retenir des candidats qui, hors fléchage, n'auraient certainement pas supporté la concurrence d'autres candidats de niveau largement supérieur ;

- il va sans dire, en outre, mais certains fléchages passés montrent que ce n'est pas une évidence partagée par tous, que les profils fléchés ou colorisés qui n'entrent pas clairement dans les thématiques interdisciplinaires de la CID sont à proscrire catégoriquement. On comprendra dans cette catégorie les postes dont le caractère interdisciplinaire reste à

démontrer (par exemple concours 46/04 en 2005 et en 2006), et ceux dont le principal mot clé relève à l'évidence d'une autre CID (par exemple concours 46/01 en 2006).

2.5 PROPOSITIONS DE COLORIAGES DE POSTES À COURT ET MOYEN TERMES

– pollutions anciennes, marqueurs, risques contemporains et développement durable (CR2) ;

– sociétés, cultures et invasions biologiques (CR) ;

– anthropologie de l'environnement (CR ou DR) ;

– agrobiodiversité et sociétés (CR ou DR) ;

– dynamique des paysages : modélisation des interactions milieu physique/processus écologiques/activités humaines (CR) ;

– étude et modélisation des processus de la dynamique côtière en relations avec les aménagements anthropiques et le changement climatique (CR) ;

– évaluations socio-économiques des produits de la prévision océanographique.

3 – LE POSITIONNEMENT NATIONAL ET INTERNATIONAL

Il est clair que le CNRS détient un rôle clé dans le développement des recherches sur le domaine interdisciplinaire qui est celui de la CID 46. Même si d'autres établissements (INRA, CIRAD, quelques universités, etc.) y tiennent une place, de façon institutionnelle

parfois, en raison de l'implication personnelle de chercheurs et d'enseignants chercheurs plus souvent, on voit mal quel acteur public, en dehors du CNRS, pourrait jouer le rôle structurant à moyen et long terme dans un champ de la recherche désormais constitué mais encore neuf, en le maintenant à l'écart des écueils toujours présents de la « recherche – action » et des dérives finalistes.

Au niveau international il s'agit encore d'une démarche assez innovante favorisant l'émergence de nouveaux champs de recherche à l'intersection de plusieurs domaines de compétences. Peu d'exemples sont connus au niveau institutionnel et là aussi le CNRS a sa carte à jouer en tant que démarche novatrice.

3.1 MODALITÉS D'INTERVENTION DU CNRS

Le champ scientifique couvert par la CID 46 s'est vu doté en quelques années des cadres conceptuels, méthodologiques et épistémologiques qui lui étaient nécessaires pour construire son objet et le légitimer. Légitimation qui provient en outre d'une forte demande sociale et politique, cristallisée récemment par la médiatisation de quelques grands désordres environnementaux de dimension planétaire (réchauffement climatique et ses conséquences visibles, appauvrissement de la biodiversité, OGM, etc.). Le CNRS se doit de renforcer son leadership dans ces domaines d'avenir en poursuivant une politique ambitieuse et déterminée qui passe par un affichage significatif d'emplois au recrutement et à la promotion, y compris au niveau post-doctoral, par le soutien à la constitution de réseaux de type GDR structurés au niveau international (GDRE et GDRI), par le lancement autonome ou la participation au lancement d'appels à projets spécifiques au niveau national (ANR) et international.

3.2 PROPOSITIONS DE PROGRAMMES INTERDISCIPLINAIRES PRIORITAIRES DANS LE CHAMP DE LA CID 46

– échelles et changements d'échelle des approches du risque dans l'environnement : du nanoscopique au global ;

– modélisation des processus historiques et prospective dans l'évaluation des risques environnementaux ;

– risques environnementaux et pauvretés.

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 47

ASTROPARTICULES

Président de la CID

Jean-Loup PUGET

Membres de la CID

Émile-Michel ARMENGAUD

Éric AUBOURG

Jean BALLE

Geneviève BÉLANGER

Karim BENAKL

Francis BERNARDEAU

Pierre BINETRUY

Luc BLANCHET

Emmanuel GANGLER

Martin GIARD

Christophe GROJEAN

Élyette JEGHAM

Jürgen KNODSEDER

Sylvie LEES-ROSIER

Marie-Christine LÉVY-NOËL

Jean-Michel MARTIN

Yannick MELLIER

David POLARSKI

Gérard SMADJA

Tiina SUOMIJARVI

INTRODUCTION

Le domaine à l'interface entre physique des hautes énergies et astrophysique, communément appelé « astroparticules », s'est fortement développé durant les dix dernières années. Le CNRS en a fait une de ses priorités scientifiques, et une commission interdisciplinaire dédiée a été créée et renouvelée.

Les grands domaines couverts par cette spécialité sont :

– l'étude des sources extrêmes dans l'Univers, produisant des particules de très haute énergie ;

– l'utilisation de l'Univers comme laboratoire d'étude des interactions fondamentales, grâce aux très hautes énergies et densités qui y sont atteintes ;

– la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'évolution de l'Univers, depuis le Big Bang jusqu'au temps présent, ce qui donne aussi accès à la physique des plus hautes énergies.

De nombreux autres thèmes viennent s'associer à ces domaines fondamentaux : tests des lois fondamentales (gravité, physique transplanckienne), astrophysique nucléaire, etc. L'astroparticule est donc un espace de rencontres entre de nombreuses disciplines de physique (physique nucléaire, physique de la matière

condensée, physique quantique, physique des plasmas, physique de la combustion, etc.), avec également une riche activité théorique.

1 – LES GRANDES QUESTIONS

Le domaine des astroparticules souhaite répondre à un certain nombre de questions, dont le nombre et la diversité expliquent l'attrait qu'il provoque :

– **le Big Bang** : la singularité initiale est-elle fondamentale, ou un reflet de notre ignorance des lois de la physique près du Big Bang ?

– **l'inflation** : son existence semble confirmée. Quels sont les mécanismes de cette phase d'expansion exponentielle de l'Univers primordial ?

– **l'asymétrie matière-antimatière** : le modèle standard de la physique des particules ne peut l'expliquer. Quelle est son origine ?

– **la matière noire** : quelle est la nature de la matière sombre ?

– **l'expansion accélérée** : quels sont les mécanismes qui la produisent ? Faut-il modifier la gravitation ou introduire de l'énergie noire ? Dans ce cas, quelle est la nature de cette énergie noire ? Est-ce une constante cosmologique ? Quelle est son équation d'état ? Quel est son lien avec l'énergie du vide de la théorie des champs ?

– **la nouvelle physique** : gravité quantique, dimensions supplémentaires (quel est le nombre exact de dimensions spatiales de l'Univers ?) ;

– **les limites de validité de la relativité générale** : de nouvelles expériences devraient permettre de tester en particulier le principe d'équivalence (entre masse gravitationnelle et masse inertielle) ;

– **les premiers objets lumineux** : quand et comment sont apparues les premières structures (amas, galaxies, étoiles) ? Quelle est la physique de la réionisation de l'Univers ?

– **les particules à très haute énergie** : quels sont les sites d'accélération ? Les mécanismes de propagation ? Quelle est la composition de ces rayons cosmiques ? Leur spectre en énergie donne-t-il des indices d'une nouvelle physique ?

– **les trous noirs** : on sait qu'ils sont associés à de nombreuses sources de particules énergétiques. Il reste beaucoup à comprendre dans les mécanismes d'accrétion et d'éjection mis en jeu ;

– **les sursauts gammas** : on commence tout juste à percevoir ce que peut être leur origine ;

– **les supernovae** : comment explosent-elles ? On est encore incapable de simuler l'explosion de certains types de supernovae, pourtant à l'origine des éléments lourds dans l'Univers ;

– **les états extrêmes de la matière** : quelle est la structure interne d'objets tels que les étoiles à neutrons ?

– **la masse des neutrinos** : quelle est la masse des neutrinos, quel est leur rôle cosmologique, quels sont leurs paramètres de mélange, à l'origine des oscillations de neutrinos récemment mises en évidence ?

2 – LA NÉCESSITÉ D'APPROCHES CROISÉES

2.1 COMPLÉMENTARITÉ THÉORIE-EXPÉRIENCES

Parmi les questions de physique fondamentale évoquées dans le paragraphe précédent, certaines se posent dans un cadre conceptuel bien déterminé – par exemple la nécessité de compléter notre connaissance du secteur des neutrinos ou encore la recherche de matière noire supersymétrique – d'autres ont des bases théoriques moins solides et nettement moins balisées.

Ainsi le problème que pose l'existence d'une énergie noire met en cause notre compréhension même de ce que peut être le vide quantique. À ce problème il n'existe pas de réponses théoriques satisfaisantes, en tout cas pas qui répondent à l'ensemble des questions posées. Les pistes envisagées font appel, qui à une nouvelle composante du fluide cosmologique, qui à des modifications de la gravité à l'aide de dimensions supplémentaires, etc. C'est sans doute à l'aide d'observations variées de l'univers à bas redshift – évolutions des grandes structures, SNs – que l'on parviendra à mieux cerner la nature du problème.

On se trouve dans une situation similaire avec la physique de l'univers primordial. Si le paradigme inflationnaire a été largement consolidé par les observations récentes, il reste un simple cadre de travail. Contrairement au cas de la matière noire, les théoriciens peinent à proposer des candidats précis au rôle d'inflation qui puissent s'insérer dans une extension du modèle standard des hautes énergies. Les progrès que l'on pourra réaliser dans ce domaine à moyen ou à long terme s'appuient sur des recherches très transversales, théoriques bien sûr, mais aussi observationnelles avec la reconstruction du spectre des fluctuations de métrique primordial à l'aide des observations des anisotropies ou de la polarisation du CMB, mais aussi de l'ensemble des traceurs des grandes structures de l'univers, catalogues de galaxies, relevés de lentilles faibles, nuages Lyman-alpha, etc.

Il est bien sûr d'autres domaines qui bénéficient de complémentarités d'approches, la recherche des ondes gravitationnelles, la compréhension du mode de fonctionnement de sites astrophysiques très énergétiques ou encore l'émergence des premiers objets de l'univers. Au-delà du travail d'investigation théorique pur, on a besoin ici de s'appuyer sur des simulations numériques dédiées de grande ampleur.

Insistons enfin pour une grande classe de questions sur la nécessité de disposer d'approches observationnelles dites « multi-messagers ».

2.2 DES STRATÉGIES MULTI-MESSAGERS

Il est clair que la compréhension fine de sites astrophysiques extrêmes passe nécessairement par la mise en œuvre de moyens observationnels inédits en astronomie traditionnelle. Il s'agit ainsi de collecter autant d'information que possible à l'aide de plusieurs messagers :

- les photons, depuis les ondes radios jusqu'aux gammas de haute énergie qui tracent les zones d'accélération de particules, d'annihilation de matière noire et l'Univers primordial ;

- les rayons cosmiques (protons et ions), qui nous renseignent sur les phénomènes d'accélération, et sur la propagation intergalactique et galactique ;

- les neutrinos, qui donnent des informations sur les zones profondes d'objets opaques aux photons ;

- les ondes gravitationnelles, produites par les mouvements de la matière (sources astrophysiques et cosmologiques, en particulier les trous noirs et les objets compacts) et par l'Univers primordial.

Soulignons que les neutrinos de haute énergie, les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie et les ondes gravitationnelles sont des domaines pionniers.

3 – PROJETS EN COURS ET FUTURS

3.1 LES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS

Plusieurs sondes permettent d'explorer la géométrie de l'Univers, et d'accéder à des informations sur sa composition et la nature de l'énergie noire : supernovae utilisées comme chandelles standards, fond diffus cos-

mologique, relevés à grand champ, cisaillement gravitationnel, oscillations de baryons. La France a une excellente position dans le domaine des supernovae et du cisaillement gravitationnel («weak shear») grâce au programme «Legacy Survey» du CFHT, à Hawaï (CFHTLS, SNLS, SNFactory). Dans le domaine du fond diffus, elle a acquis une expérience certaine grâce à l'expérience ballon Archéops, et joue un rôle important dans la mission spatiale Planck, prévue pour 2007, avec un rôle leader dans un des deux instruments (HFI), qui devrait permettre des progrès importants sur l'étude de la polarisation du fond cosmologique. Il est important d'assurer le retour scientifique de ces projets.

Le projet américain SDSS (Sloan Digital Sky Survey), dont la France est absente, bénéficie en ce moment d'un retour scientifique exceptionnel, en grande partie dû à la combinaison entre photométrie à grand champ et spectroscopie.

Vue l'importance des sujets concernés (cisaillement gravitationnel, supernovae, oscillations de baryons, mesures d'amas de galaxies), la France (et l'Europe) doivent définir une stratégie de participation à de futurs projets d'astronomie grand champ, qui bénéficieraient, à l'instar du SDSS, d'une association avec un survey spectroscopique. En particulier se posent les questions d'une participation au projet LSST et du rôle de l'ESO. L'extension dans le domaine infrarouge de ces surveys (par exemple avec VISTA) permet de caractériser des objets plus lointains ; c'est essentiel pour la recherche de supernovae à $z > 1$.

De la même façon, la France est pour l'instant absente des projets concernant les mesures de la raie à 21 cm de l'hydrogène aux redshifts cosmologiques, qui donne accès en particulier à la physique de la réionisation et aux oscillations de baryons. À court terme il serait possible d'envisager une collaboration avec des projets tels que LOFAR en Europe ou des projets analogues aux USA et en Australie, et à plus long terme au projet SKA (Square Kilometer Array).

Du côté du fond diffus cosmologique, la prochaine étape est la mesure de sa polarisation, en particuliers des modes B. L'expérience BRAIN, en Antarctique, et le projet spatial SAMPAN sont dédiés à ce type de mesure. À l'international un certain nombre d'expériences, au Pôle Sud ou dans l'Atacama, sont en cours de construction. La comparaison entre les possibilités d'une nouvelle expérience au sol et d'un satellite est indispensable.

Un autre aspect important du fond diffus cosmologique est l'étude des avant-plans, à la fois en tant que «pollution» du signal cosmologique, et en tant qu'objets d'étude en soi (effets SZ, Rees-Sciama, physique de la Galaxie et de la MHD interstellaire). La corrélation avec des surveys optiques tels que ceux mentionnés ci-dessus est indispensable afin d'extraire les signaux les plus faibles.

3.2 ASTRONOMIE GAMMA

La France a une excellente position dans le développement d'instrumentation dans ce domaine, illustrée par son rôle de leader dans le satellite INTEGRAL (PI du spectromètre SPI, fourniture du détecteur principal de l'imageur IBIS), et à la contribution importante au télescope Cherenkov HESS en Namibie. Il convient d'assurer le retour scientifique de HESS, et le développement de HESS2 est une priorité. Le lancement du satellite GLAST est prévu pour 2007 ; malgré le retrait du financement CNES en 2003, l'IN2P3 et le CEA contribuent significativement à ce projet. HESS2 et GLAST explorent tous deux une gamme de fréquence peu observée jusqu'à présent mais cruciale.

Le projet Simbol-X en collaboration avec l'Italie, choisi dans le cadre de l'appel d'offres du CNES de satellites en vol en formation, ouvre une nouvelle génération de télescopes spatiaux pour l'astronomie à hautes énergies. Le lancement est prévu pour 2012.

Dans le domaine des sursauts gammas, une étape importante est l'analyse des contre-

parties optiques qui peuvent servir de sondes cosmologiques. C'est un des enjeux du projet X-Shooter (spectrographe au VLT, prévu pour 2007). Les enjeux concernent à la fois la cosmologie (diagramme de Hubble à plus grand z qu'avec des supernovae) et la physique des hautes énergies.

Le satellite SVOM/ECLAIRS, développé dans le cadre de la collaboration avec la Chine et prévu pour un lancement fin 2011, améliorera la détection des sursauts eux-mêmes.

3.3 RAYONS COSMIQUES DE HAUTES ÉNERGIES

L'excellente présence de la communauté française dans l'expérience AUGER, en Argentine, doit être soulignée.

La possibilité de détecter les rayons cosmiques par les ondes radio produites lors du développement de la gerbe est actuellement explorée par le projet CODALEMA. Outre son intérêt pour les rayons cosmiques (coût, et disponibilité jour et nuit du détecteur), les compétences acquises pourraient se révéler utiles dans le domaine de l'astronomie impulsionnelle et dans le cadre d'une future participation à des projets de relevés cosmologiques tels que SKA et LOFAR.

Le futur de l'expérience AMS est lié à celui de la station spatiale internationale, et donc incertain.

3.4 MATIÈRE NOIRE NON BARYONIQUE

L'expérience EDELWEISS a obtenu d'excellents résultats, en partie grâce à l'existence du Laboratoire Souterrain de Modane. La phase EDELWEISS II utilise 10 kg de germanium. Une R&D vers la tonne est entamée, il convient maintenant de construire un projet européen autour de la technologie la plus adéquate. Il est

important de pouvoir utiliser différents matériaux, et pour cela de disposer de plusieurs méthodes de réjection des particules chargées. Pour maintenir la bonne position internationale des équipes françaises sur ce domaine, un effort important sur les technologies utilisées est indispensable.

La détection indirecte offre de bonnes perspectives, aussi bien par l'intermédiaire de détecteurs gamma qu'avec des télescopes à neutrinos tels qu'Antares.

Du côté des accélérateurs, le LHC et le possible futur accélérateur linéaire pourraient apporter leur contribution à l'énigme de la matière noire, en créant en laboratoire les particules dont elle est peut-être formée.

3.5 NEUTRINOS

Pour les neutrinos de haute énergie, l'expérience Antares est en cours de déploiement et permet d'envisager un télescope à neutrinos en vraie grandeur (KM³).

Du côté des basses énergies, plusieurs technologies sont utilisables et actuellement explorées, tel le projet Double-CHOOZ (auprès d'un réacteur) ou les projets auprès d'accélérateurs, qui amélioreront notre compréhension des oscillations de neutrinos et pourraient aider à comprendre l'asymétrie matière-antimatière. Un détecteur Cherenkov Mégatonne, dans le tunnel du Fréjus, permettrait d'améliorer les limites sur la durée de vie du proton, et de détecter les neutrinos en provenance d'une supernova proche. Dans ce domaine, l'élaboration d'une stratégie à long terme et d'un choix entre ces méthodes est indispensable.

3.6 GRAVITATION

Microscope, actuellement en construction, testera le principe d'équivalence. En ce qui concerne les ondes gravitationnelles,

VIRGO entre dans sa phase d'exploitation, avec une très bonne participation française, et sera suivie par une phase VIRGO 2. L'étape suivante consiste à explorer une autre gamme de fréquence, probablement beaucoup plus riche, avec une expérience spatiale, LISA, dans laquelle la France vient d'entrer. Une première étape est le démonstrateur LISA-PathFinder. La détection des ondes gravitationnelles à l'aide d'instruments de type LISA devrait devenir, à long terme, un outil observationnel d'importance comparable à l'optique.

Le chronométrage des pulsars rapides permet de mettre une limite supérieure aux ondes gravitationnelles de périodes longues, en particulier les ondes gravitationnelles d'origine primordiale. Des réseaux internationaux de chronométrage des pulsars se mettent actuellement en place, pour réaliser le « pulsar timing array ».

Dans le domaine de la métrologie :

- le chronométrage des pulsars rapides permettra, grâce à la construction d'un référentiel céleste, de lier le système de référence du système solaire au système de référence extragalactique ;

- la réalisation d'éphémérides de pulsars à l'aide de l'observation radio est indispensable pour rechercher les contreparties gamma de ces objets, en particulier avec GLAST.

3.7 THÉORIE

Les grands chantiers de physique fondamentale restent liés d'une manière ou d'une autre au problème de la construction d'une théorie unifiant gravité et mécanique quantique. La théorie des cordes en est de loin l'approche la plus élaborée. Il reste qu'elle ne propose pas d'extension bien définie du modèle standard des particules.

In fine ce qu'on aimerait avoir c'est évidemment un scénario complet :

- qui rende compte d'une phase inflationnaire permettant d'engendrer les grandes structures de l'univers ;

- qui contienne une extension du modèle standard des particules avec une (ou des) particule(s) de matière noire et qui permette une baryogénèse ;

- qui rende compte d'une énergie noire.

On en est encore loin ; les travaux actuels s'attachent à l'une ou l'autre de ces facettes, le plus souvent dans le cadre de la théorie des cordes, quelquefois dans des approches alternatives. À ce jeu-là, c'est la richesse d'une communauté qui en fait sa force, avec des experts en théorie des cordes, en physique de l'univers primordial, en physique des particules ou encore en relativité générale. La communauté française s'est indéniablement étoffée dans ces domaines ces dernières années. L'effort doit être poursuivi.

Une autre grande activité théorique est celle de simulations numériques de milieux complexes. Citons dans ce cadre le projet Horizon dont un des objectifs est de mieux cerner les phénomènes physiques liés à la formation des premiers objets de l'univers ou encore l'évolution des grandes structures de l'univers. On peut aussi citer la réalisation de simulations numériques de coalescence d'objets compacts pour la génération des ondes gravitationnelles ou encore la réalisation de codes de magnétohydrodynamique décrivant la physique des jets ou des disques d'accrétion. Soulignons que ce sont là de véritables projets qui nécessitent des ressources humaines et techniques importantes. D'autres chantiers sont en cours d'ouverture comme la compréhension de la propagation de particules dans les milieux astrophysiques, le développement des gerbes atmosphériques.

3.8 QUESTIONS STRATÉGIQUES POUR CE SECTEUR INTERDISCIPLINAIRE

Les sections précédentes montrent la richesse de ce secteur aussi bien par les questions fondamentales posées que par les appro-

ches méthodologiques multiples qu'il nécessite.

Les chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs travaillant sur ces thèmes appartiennent au CNRS, au CEA et aux universités. L'annexe 1 donnera liste des unités concernées et leur répartition entre établissements.

L'existence de la CID 47 a non seulement permis le recrutement de chercheurs amenant dans une unité le savoir faire et la culture d'un autre département du CNRS mais a eu, par l'existence même de ces recrutements sur des critères d'interdisciplinarité, un effet incitatif sur une partie importante de la population de jeunes docteurs qui ont délibérément choisi d'aller effectuer un séjour post-doctoral dans une unité relevant d'un département ou d'une culture différents de celle de l'unité ou il/elles avaient effectué leur thèse. La CID a aussi recruté au niveau CR1 et DR2 des chercheurs étrangers de haut niveau qui ont permis d'accélérer le développement de nouveaux sujets critiques. Enfin la CID a organisé un séminaire de prospective qui a réuni les chercheurs de ces thématiques et, outre la production d'un document de prospective, a aussi permis à ces communautés de débattre et d'apprendre à se connaître.

Notons cependant que ces recrutements de chercheurs étrangers sont rendus difficiles par les salaires et les moyens de recherche que la France peut offrir par rapport à d'autres pays, comme en témoignent des désistements au niveau CR1. En outre, sur certains concours, des fléchages – non pertinents pour une CID – ont compliqué le processus de recrutement.

Ce bilan est donc très positif. Les CID ne sont pas, et n'ont pas de raison d'être, des structures permanentes. Il est par contre essentiel que quand une CID est dissoute, la redistribution des thématiques qu'elle couvrait et leur place dans le dispositif de recherche soient pleinement pris en compte dans le nouveau découpage des sections du comité national qui lui non plus n'a pas vocation à être immuable.

Au sein du CNRS, tous les chercheurs et ingénieurs travaillant sur ces thèmes dépen-

dent du nouveau département MPPU. Les grands projets instrumentaux soit d'observation soit de simulation sont pilotés par l'un des deux instituts (IN2P3 et/ou INSU), souvent en collaboration avec le CEA et avec des moyens mis en place par le Centre d'Études Spatiales. De plus, trois grandes agences internationales – le CERN, l'ESA et l'ESO – pilotent les grands projets internationaux de ce secteur. Cette structure complexe appelle plusieurs remarques et suggestions :

- le partage des responsabilités entre départements et instituts doit impérativement être clarifié pour ce qui concerne les moyens humains que le CNRS dédie aux grands projets de ces secteurs, en particulier aux TGE internationaux. Les agences internationales exigent de plus en plus des engagements précis et *contractualisés*. Les mécanismes pour la mise en place d'une part, le suivi d'autre part de ces engagements doivent être établis en liaison étroite avec les établissements partenaires nationaux (CEA, CNES) ;

- la prospective de cette thématique doit être coordonnée en impliquant toutes les agences concernées, afin de définir en même temps les questions scientifiques critiques pour la période concernée et les projets dans lesquels les équipes françaises doivent s'engager. Cette prospective ne peut se faire valablement qu'avec une bonne visibilité de la situation internationale et surtout européenne. Il est à noter que l'articulation de la stratégie du CNRS par rapport aux structures européennes est implicitement incluse dans « positionnement national et international » mais pas explicitée. Dans le secteur concerné par ce rapport, le contexte international est celui de la compétition ou de la collaboration bilatérale avec les équipes travaillant sur les mêmes sujets, mais surtout l'organisation européenne de la recherche essentielle pour un secteur ou les projets sont souvent lourds ;

- le recrutement de chercheurs sur les thématiques nouvelles croissantes doit être soutenu par le découpage et l'intitulé des futures sections du comité national et par des coloriages pluriannuels de postes ;

– cette thématique représente une fraction grandissante des activités des deux instituts du CNRS (IN2P3 et INSU) qui est distribuée entre eux. Le fonctionnement de ces instituts doit être rediscuté pour tenir compte de cette évolution.

Index des auteurs

Les références renvoient au numéro de page.

- A**MSILI Pascal, 31
ANDRÉ Jean-Claude, 55
ARMENGAUD Émile-Michel, 63
AUBOURG Éric, 63
AURAY Jean-Paul, 1
AUROUX Aline, 7
- B**ALLET Jean, 63
BATEMAN-NOVAES Simone, 1
BAUDA Pascale, 55
BAUNEZ Christelle, 1
BEAUVILLAIN Pierre, 7
BÉLANGER Geneviève, 63
BENAKL Karim, 63
BERNARDEAU Francis, 63
BERTRAND Gilles, 7
BINETRUY Pierre, 63
BLANCHET Luc, 63
BOISSEAU Patrick, 7
BOTTERO Jean-Yves, 55
BOULLIER Dominique, 7
BOUVARD Manuel, 1
BUNGENER Martine, 1
- C**ADOR Martine, 1
CASELLAS Claude, 1
CAVE Christian, 31
CELLIER Dominique, 23
CHAILLAN Franck, 1
COGNARD Christian, 23
- CORNU Marie, 55
- D**EL CUETO Carlos, 31
DELEAGE Gilbert, 23
DENIS Michel, 31
DERVAUX Benoît, 1
DJUKIC Jean-Pierre, 7
DOUILLARD Jean-Marc, 7
DREYSSE Hugues, 7
DRILLON Marc, 7
DUFOURC Érick, 23
DUTOUR Olivier, 1
- E**L MASSIOUI Farid, 1
ENCLOS Philippe, 1
- F**ABRIGOULE Colette, 31
FAINI Giancarlo, 7
FASANO Laurent, 1
FLAVIGNY Pierre-Olivier, 23
FRADIN Bernard, 31
FROIDEVAUX Christine, 23
- G**ANDRILLON Olivier, 23
GANGLER Emmanuel, 63
GARMY Pierre, 55
GARNERO Line, 31
GASCUEL Olivier, 23
GENTAZ Édouard, 31
GIARD Martin, 63
GIBERT Janine, 55
- GILBERT Claude, 55
GRANGE Thierry, 23
GRÉGOIRE Michel, 55
GROJEAN Christophe, 63
GROSS Christian, 1
GUILLEN François, 7
- H**ELARY Gérard, 7
HERMANN Nicolas, 23
HIRSCH Jacky, 55
HOSSAERT-MCKEY Martine, 55
HUDELOT Christian, 31
- J**EGHAM Élyette, 63
- K**NODLSEDER Jürgen, 63
- L**ACHARME Jean-Paul, 31
LACROIX André, 55
LAREDO Philippe, 7
LASCOUMES Pierre, 55
LAURENT Louis, 7
LEES-ROSIER Sylvie, 63
LÉVI Yves, 1
LÉVY-NOËL Marie-Christine, 63
- M**AALOUM Julie, 23
MARENDAZ Christian, 31
MARTIN Jean-Michel, 63
MASSON Guillaume, 31
MAUREL Nathalie, 23

MELLIER Yannick, 63
MICHEL Christian, 23
MICHON Geneviève, 55
MILLET Jacques, 1
MOATTI Jean-Paul, 1

NESPOULOUS Jean-Luc, 31

OGÉ Frédéric, 55

PACHERIE Élisabeth, 31
PAUGAM-MOISY Hélène, 31
PERTHAME Benoît, 23
PIERREL Jean-Marie, 31
POLARSKI David, 63

PRUM Bernard, 23
PUGET Jean-Loup, 63

RIGALLEAU François, 31
ROMI Raphaël, 55
ROZENBLAT Céline, 55

SAGOT Marie-France, 23
SANDERS Léna, 55
SCHMOLL Patrick, 7
SCHWARTZ Jean-Luc, 31
SEMPÈRE Richard, 55
SIMONSON Thomas, 23
SMADJA Gérard, 63
SUOMIJARVI Tiina, 63

TAZDAÏT Tarik, 55
THINUS-BLANC Catherine, 31
THORPE Simon, 31
TIFFOCHE Christophe, 1
TOUBOUL André, 7
TRESSET Anne, 55

USSELMANN Marie-Madeleine, 55

VINCK Dominique, 7
VIOUX André, 7

WALTER Gérard-Richard, 31
WESTHOF Éric, 23, 11

Coordination et réalisation

COORDINATION SCIENTIFIQUE

Gilles BOËTSCH

COORDINATION TECHNIQUE

SGCN – Caroline BAUER-HACKER

RÉALISATION

CNRS ÉDITIONS