

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 « cognitiviser » 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 important 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 paléanthropologie 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'INGÉNIEURIE

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.