

## COMPORTEMENT – COGNITION – CERVEAU

*Président de la section*

Jean-René CAZALETS

*Membres de la section*

Pierre BARROUILLET

Christelle BAUNEZ

Driss BOUSSAOU

Manuel BOUVARD

Martine CADOR

Franck CHAILLAN

Henri COULAUD

Carlos DEL CUETO

Farid EL MASSIOUI

Édouard GENTAZ

Martin GIURFA

Martine HAUSBERGER

Pascal HUGUET

Françoise JOUBAUD

François RIGALLEAU

Angela SIRIGU

Arlette STRERI

Catherine THINUS-BLANC

Simon THORPE

Nicolas VIBERT

**Les mots clés de la section**

– neurosciences comportementales et cognitives normales et pathologiques, homme et modèles animaux, imagerie cérébrale fonctionnelle ;

– psychologie cognitive, psycholinguistique, psychologie sociale, psychologie du développement, neuropsychologie ; processus normaux et pathologiques ;

– éthologie : mécanismes et fonctions ;

– psychiatrie et psychopathologie ;

– modélisation des processus cognitifs et neurosciences computationnelles ;

– ergonomie cognitive ;

– développement, plasticité, apprentissage, mémoire ;

– processus sensoriels, perceptifs, moteurs et sensori-moteurs ;

– représentations, fonctions et processus cognitifs ;

– langage, raisonnement, attention, émotions.

**Quatre Départements Scientifiques de rattachement** (depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007)

– Mathématiques, Physique, Planète et Univers ;

- Sciences du Vivant ;
- Sciences Humaines et Sociales ;
- Sciences et Technologies de l'Information et de l'Ingénierie.

## **1 – INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Comportement, Cognition, Cerveau : l'intitulé trinitaire de la section 27 indique de manière explicite les trois objets qui constituent le socle des champs disciplinaires ayant vocation à s'épanouir au sein de la communauté qu'elle rassemble. Si l'on essaie de décrire les liens qui tissent la trame des études menées par les chercheurs et les laboratoires de cette section, on doit souligner qu'elles reposent sur un objet d'étude commun plus que sur un regroupement de méthodologies. Le comportement, c'est-à-dire l'organisme en fonctionnement, est en effet le niveau central d'approche dans notre section. Il s'agit du seul moyen d'accès à des mesures objectives et quantifiables des processus cognitifs, mais aussi d'un objet essentiel, à l'interface entre mécanismes et fonctions, dans une relation réciproque avec le fonctionnement cérébral. Au cours des quelques années écoulées, il est apparu de plus en plus évident que l'approche interdisciplinaire était un enjeu essentiel pour les sciences du comportement. L'étude du comportement et sa simulation, ainsi que celle des bases biologiques et sociales de la cognition animale et humaine dans ses dimensions comparative et évolutive, constituent par ailleurs des points d'interface entre Sciences du Vivant, Sciences Humaines et Sociales et Sciences et Technologie de l'Information et de la Communication. Cette implication de la section 27 dans de nombreuses approches transversales est matérialisée par son intervention dans deux des six commissions interdisciplinaires (42, Santé et société ; 45, Cognition, Langage, Traitement de l'Information, Systèmes

Naturels et Artificiels) et quatre des nouveaux départements scientifiques. Le corollaire de cette évolution au cours des années récentes est l'articulation de plus en plus prégnante de nombreux groupes de recherche autour d'outils lourds, qui permettent d'aborder de nouvelles problématiques et d'enrichir les autres (méthodes d'imagerie fonctionnelle, réalité virtuelle, modélisation, etc.), et qui ont radicalement modifié les besoins et les demandes en équipement et fonctionnement de la plupart des laboratoires du fait de l'apparition d'importantes plate-formes techniques. Une autre conséquence de ces évolutions est le relatif morcellement des groupes de recherche situés aux interfaces, qui sont souvent amenés à être insérés dans des laboratoires qui ne dépendent pas directement de la section. Il est d'autant plus important que ces groupes puissent s'identifier à une communauté qui leur permette de faire évoluer leurs concepts. Enfin, une autre spécificité des recherches développées autour du comportement est l'intégration forte de la composante « humaine », tant dans ses aspects normaux que pathologiques, qui situe nombre d'équipes à l'interface avec la recherche clinique dans les domaines du langage, de la perception, de la motricité, de la mémoire, de la psychiatrie... Les pages qui suivent précisent nos réflexions de conjoncture et prospective pour chacun des trois grands domaines de recherche qui composent la section 27.

## **2 – L'ÉTHOLOGIE**

### **2.1 DÉFINITION ET QUESTIONS FONDAMENTALES**

L'objet d'étude de l'éthologie est le comportement, ce qui place cette discipline à un niveau central dans les Sciences du Vivant : celui de l'organisme en interaction avec son milieu. Elle présente également la particularité d'être intégrative et par essence interdiscipli-

naire. En s'appuyant sur les quatre questions fondamentales que sont l'ontogenèse, la causalité, la fonction et l'évolution des comportements, elle crée naturellement des ponts avec la génétique, la neurobiologie, la psychologie, l'écologie, la physiologie et d'autres disciplines proches des Sciences du Vivant et des Sciences Humaines et Sociales.

*L'ontogenèse*, l'approche du développement et des phénomènes de plasticité qui lui sont liés, est une préoccupation commune à toutes les équipes d'éthologie. Cette approche pose des questions fondamentales telles que l'importance de l'environnement prénatal et post-natal, des congénères adultes et non adultes, de l'expérience et des phénomènes de plasticité sous-jacents. Apprentissage et mémoire permettent à l'animal de bénéficier de ses expériences. L'éthologie peut ici apporter de nouveaux éclairages sur l'importance de l'expérience sociale et non sociale sur le développement des capacités cognitives. Par ailleurs, quand une approche neurobiologique y est associée comme dans le cas de la neuroéthologie, il est possible d'identifier des réseaux nerveux et des structures cérébrales responsables de cette plasticité. En ce sens, l'avantage de travailler avec des modèles animaux dont l'organisation du système nerveux est moins complexe que celui de l'Homme apparaît évident.

*La causalité*, c'est-à-dire l'approche des mécanismes sous-jacents aux comportements est également un des aspects développés dans toutes les équipes. Comprendre comment les facteurs environnementaux sociaux et non sociaux sont pris en compte par l'organisme et induisent sa réponse comportementale implique de s'intéresser aux bases physiologiques du comportement et aux relations cerveau-comportement. En ceci, l'éthologie rejoint clairement des préoccupations des sciences cognitives.

*Fonction et évolution* des comportements sous-tendent également ces approches, et déterminent en grande partie le choix des comportements et les espèces à étudier. L'étude des mécanismes se fait en gardant à l'esprit la fonction (alimentaire, sociale, reproductive, etc.)

du comportement étudié, elle-même objet d'étude. La dimension comparative est aussi présente chez toutes les équipes et permet d'aborder la question de l'évolution des comportements, en s'appuyant sur homologues et analogues. Elle rappelle par ailleurs que l'évolution n'est pas linéaire du simple au complexe. Les espèces étudiées par les équipes françaises vont de l'invertébré à l'homme, avec une représentation particulièrement importante des insectes et des oiseaux, un peu plus focalisée des mammifères. Deux équipes disposent d'un centre de primatologie. L'éthologie humaine est très peu représentée et mériterait de se développer, ce qui créerait une interférence supplémentaire intéressante avec la psychologie.

## 2.2 ÉTHOLOGIE ET COGNITION

L'originalité de l'éthologie par rapport aux études sur la cognition est l'emploi de modèles animaux choisis sur la base de leurs aptitudes dans leur milieu naturel. La diversité des modèles animaux, caractéristique des travaux éthologiques, permet de découvrir des compétences comportementales et/ou cognitives qui resteraient insoupçonnées si l'on ne se référait qu'aux « modèles expérimentaux classiques ». À partir de ces études, une véritable approche comparative des processus cognitifs et des architectures neurales qui les sous-tendent est possible. Il est donc indispensable de reconnaître l'importance des études sur des modèles animaux non traditionnels et de défendre activement cette diversité biologique, qui est à la base même d'un des objectifs d'étude déclarés du Département Sciences du Vivant, l'émergence de la pensée. Par ailleurs, cette défense est cruciale dans la perspective plus vaste de la caractérisation et de la défense de la biodiversité qui nous entoure. L'étude comparée des processus cognitifs chez un nombre important d'espèces animales, dont les contraintes écologiques et évolutives sont différentes, s'inscrit clairement dans cette perspective.

## **2.3 ÉTHOLOGIE ET COMMUNICATION**

L'étude de la communication est un axe de recherche très présent dans toutes les équipes d'éthologie française. Là encore, la diversité des modèles animaux, et par conséquent de leurs modes de communication, est d'un apport considérable pour envisager toutes les « facettes » de la communication, élément clé de la vie sociale. L'éthologie a donc une place naturelle dans les débats autour de l'évolution de la communication et du langage, mais aussi dans la construction des systèmes artificiels.

## **2.4 L'ÉTHOLOGIE DANS L'ÈRE POST-GÉNOMIQUE**

Alors que la caractérisation des génomes d'espèces modèles est devenue une réalité, l'étude fonctionnelle du rôle des informations génétiques caractérisées reste extrêmement faible. Seule une approche intégrative, basée sur le comportement animal, peut d'un côté aider à combler ce vide, et d'un autre côté à faire comprendre que le comportement observé ne résulte pas directement des gènes, mais de l'interaction de ceux-ci avec des environnements donnés. Les éthologistes ne doivent pas dans ce contexte devenir des prestataires de service pour la caractérisation de gènes donnés. Au contraire, ils doivent pouvoir développer leur vision intégrative basée sur le fait que quand un gène est caractérisé, le véritable travail commence. La connaissance très précise des comportements dans tous leurs aspects reste une base indispensable si l'on veut « poser les bonnes questions » au cerveau et à la génétique.

## **2.5 PRÉSENT ET FUTUR DE L'ÉTHOLOGIE**

Les dernières années ont vu l'éthologie française se restructurer et s'affirmer (voir le

paragraphe sur le Groupement de Recherche « Éthologie » ci-dessous). Au-delà d'équipes bien insérées dans différentes unités, des laboratoires entièrement orientés vers différents aspects du comportement animal ont acquis une présence et un rayonnement reconnus au niveau national et international. La place de l'éthologie dans les sciences cognitives est essentielle et plusieurs équipes ont laissé une large part à la neuroéthologie, et donc à la compréhension des bases neuronales des comportements, notamment de ceux qui mettent en œuvre différents niveaux de plasticité. De même, des interfaces avec la robotique et l'intelligence artificielle se sont développées à partir de la caractérisation intégrale de composantes comportementales chez différentes espèces. Cette caractérisation permet la génération d'algorithmes et de routines de travail incorporables dans divers types de systèmes artificiels, dont les applications sont nombreuses.

Malgré tous ces attraits, et un remarquable essor des publications des équipes d'éthologie françaises, la discipline reste fragile par manque d'effectifs et parfois de moyens. Ceci devient préoccupant dans un contexte où la tendance affirmée de plusieurs de ces équipes est d'intégrer des méthodes de génétique, biologie moléculaire, imagerie de l'animal et robotique à leurs approches comportementales classiques. L'enrichissement de l'étude du comportement animal et de ses mécanismes, qui passe par l'approfondissement de ces nouvelles voies, ne peut se faire qu'en rendant disponibles les moyens d'atteindre ces buts. Il est donc important que des moyens soient donnés à l'étude du comportement en tant que telle.

Enfin, une vigilance est nécessaire aussi pour que soit maintenue l'éthologie des primates, garante d'une meilleure connaissance des bases comportementales sur lesquelles appuyer d'éventuelles comparaisons et hypothèses évolutives. Deux structures existent, elles doivent être soutenues pour pouvoir persister dans la compétition internationale.

Il est donc essentiel que la visibilité de l'éthologie française augmente rapidement,

qu'il y ait une reconnaissance des apports de cette discipline dans des domaines où elle est rarement citée, comme celui des sciences cognitives, et par conséquent que ses effectifs et moyens, CNRS en particulier, croissent rapidement. Les équipes existantes et bien identifiées, faisant preuve d'excellence et de reconnaissance internationale, doivent être soutenues activement. Par ailleurs, il est important que les plus petites équipes intégrées dans des structures plus importantes rattachées à d'autres disciplines soient rendues plus visibles.

## **2.6 LE GROUPEMENT DE RECHERCHE « ÉTHOLOGIE », GDR 2822 DU CNRS**

La création du GDR d'éthologie en 2004 pour 4 ans (2004-2007) a permis de rassembler la communauté française des éthologues autour d'objectifs thématiques de la discipline, mais aussi largement articulés avec ceux des disciplines voisines. 23 équipes sont impliquées, soit environ 110 chercheurs et enseignants chercheurs. Des journées annuelles du GDR sont organisées par les Unités qui constituent le cœur du GDR (Villetaneuse-Paris 2004, Rennes 2005, Toulouse-Seix 2006, Dijon 2007) ainsi que des ateliers (Villetaneuse 2006, Toulouse 2007, Tours 2007, Dijon 2007). Les actions de collaboration entre les équipes, notamment les thèses en co-direction, sont favorisées et aidées. À la fin de cette période la communauté souhaite poursuivre cette expérience et demandera le renouvellement du GDR selon 3 axes : mécanismes du comportement et développement, fonctions et adaptation, éthologie et société.

La communauté s'appuie sur trois unités mixtes de recherche dont les travaux sont centrés sur le comportement et la cognition animale :

Le *Laboratoire d'Éthologie Expérimentale et Comparée* (LEEC) de Paris 13 a pour objectif

l'étude de la vie sociale en s'appuyant sur des modèles insectes et mammifères, et plus récemment en intégrant des recherches en éthologie humaine. Sont abordées des questions comme la reconnaissance sociale, l'analyse comparative des systèmes sociaux, les relations entre espèces et l'adaptation au milieu. Le développement de collaborations avec les sciences et technologies de l'information et de la communication permet d'aborder de façon nouvelle et originale des questions liées au fonctionnement social ou à l'analyse fine des indices de reconnaissance sociale chez l'homme. Les liens avec la biologie moléculaire permettent des apports importants en matière de génétique (apparentements) et de génomique (plasticité comportementale).

L'unité «*Éthologie Animale et Humaine*» (EthoS, UMR 6552) de Rennes 1 centre ses recherches sur le comportement social et la relation individu-groupe. L'accent est mis sur la dimension comparative (Insectes, Oiseaux, Mammifères primates et non primates ; homme/animal) et intégrative, depuis l'analyse fine des mécanismes neuronaux de la perception jusqu'à la dimension évolutive (phylogénie). Les thèmes abordés sont l'influence des congénères sur le développement comportemental, les caractéristiques individuelles et le fonctionnement social, la communication et la perception, et l'évolution de la vie sociale.

L'étude des processus cognitifs mis en jeu tient une place importante : plasticité-apprentissage, latéralité, mécanismes centraux. La dimension interdisciplinaire est marquée par des liens avec la neurobiologie, la physiologie, mais aussi les sciences humaines et sociales et la santé. Une place importante est donnée à la relation éthologie-société (relation homme/animal, remédiations, bien-être, etc.).

Le *Centre de Recherches sur la Cognition Animale* (UMR 5169, Toulouse) a pour objectif principal l'étude pluridisciplinaire et comparée des processus cognitifs chez divers modèles animaux allant des invertébrés aux vertébrés.

Au niveau de l'individu, les études se concentrent sur les processus perceptifs, l'attention sélective, l'apprentissage et la mémorisation

d'indices ponctuels et des repères spatiaux. La compréhension de ces processus nécessite la mise en œuvre d'études pluridisciplinaires relevant d'approches diverses comme l'éthologie, la psychologie expérimentale, la neuroéthologie, la neurobiologie, la biologie moléculaire et la modélisation. Dans ce cadre, l'étude du cerveau animal et de sa plasticité est une priorité de cette unité.

Au niveau des sociétés ou des espèces vivant en groupe, les études se centrent sur les règles comportementales permettant la coordination d'activités au sein des groupes, d'où peuvent émerger, par des processus d'auto-organisation, des comportements collectifs complexes. La cognition distribuée reposant sur les interactions et la transmission directe ou indirecte des informations entre individus est ainsi étudiée. Dans ce cadre, des approches d'éthologie, de modélisation, de physique et de robotique sont employées.

D'autres équipes sont intégrées dans des unités de recherche à dominante non éthologique, relevant de disciplines variées :

- la neurobiologie dans le cas de l'équipe *Communications Acoustiques* intégrée au Laboratoire de Neurobiologie de l'Apprentissage, de la Mémoire et de la Communication (CNRS UMR 8620) à Orsay. Cette équipe concentre ses recherches sur l'adaptation des systèmes de communication acoustique au milieu (en particulier en environnement bruyant) et aux signaux acoustiques impliqués dans les barrières entre espèces. Un aspect important est la reconnaissance individuelle. Les modèles animaux incluent Insectes, Oiseaux et Mammifères marins ;

- la physiologie dans le cas de l'équipe *Comportement, Neurobiologie, Adaptation* de l'unité de Physiologie de la Reproduction et des Comportements du centre INRA de Nouzilly (CNRS UMR 6175). Cette équipe travaille sur les mécanismes physiologiques et neurobiologiques de l'établissement du lien mère-jeune et des émotions, chez des Oiseaux et Mammifères ongulés domestiques, en alliant recherche fondamentale et appliquée ;

- l'équipe *Éthologie des Primates* de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg (CNRS UMR 7178) concentre ses recherches sur l'organisation sociale et la transmission d'information, ainsi que sur les processus de décision collective ;

- l'écologie dans le cas de l'équipe *Écologie Comportementale* du Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive de Montpellier (CNRS UMR 5175), qui mène des recherches sur la communication acoustique et olfactive chez les Oiseaux ainsi que sur la navigation de ces animaux, essentiellement en milieux extrêmes (manchots, puffins, etc.) ;

- enfin, le Centre des Sciences du Goût de Dijon (CNRS UMR 5170) intègre une équipe d'éthologie qui travaille essentiellement sur les acquisitions olfactives chez l'enfant et le jeune mammifère.

Plusieurs équipes d'accueil ou autres unités sont également associées au GDR : l'équipe de Caen développe des recherches neuroéthologiques (développement, plasticité) chez les Céphalopodes, celle de Paris X sur les préférences acoustiques (effets de l'expérience, fonctions) et la cognition sociale chez l'Oiseau (canaris, perroquets). L'unité INRA de Theix travaille sur les émotions, la relation homme/animal et le bien-être animal chez les ovins et bovins.

## 2.7 CONCLUSIONS SUR L'ÉTHOLOGIE

En conclusion, il est essentiel que l'importance des apports de l'éthologie soit reconnue et sa visibilité accrue, pour permettre un accroissement urgent de ses effectifs et de ses moyens. Son rôle d'interface entre neurosciences et psychologie/sciences humaines, et l'apport de modèles animaux diversifiés, sont un enrichissement évident pour tous les domaines liés au comportement, celui des sciences cognitives en particulier.

## 3 – LA PSYCHOLOGIE

### 3.1 DÉVELOPPEMENT COGNITIF ET PSYCHOLINGUISTIQUE

#### Le développement de l'enfant

Les études sur le *développement de l'enfant*, en France, concernent aussi bien le développement sensori-moteur que le développement du langage. Concernant le premier aspect, des recherches portent sur la représentation du monde physique. Notre pays s'insère dans les recherches internationales sur les compétences précoces tout en présentant des spécificités, avec des travaux sur les intégrations entre modalités sensorielles (e.g., toucher/vision) et sur la coordination perception-motricité. D'autres travaux tentent de concilier l'existence de compétences précoces et d'erreurs persistantes chez les enfants, en particulier en invoquant une maturation tardive des capacités d'inhibition.

Les recherches prennent aussi une orientation plus appliquée. Les applications sont soit de nature pédagogique (étude des apprentissages scolaires et de leurs difficultés, notamment la dyslexie, la dyscalculie, etc.), soit du domaine de la santé (études des pathologies comme l'autisme, le syndrome de Williams, les hyperactifs, etc.). La neuropsychologie développementale est en pleine expansion. La question de l'intelligence demeure également un ancrage important, avec notamment le dépistage et la prise en charge des enfants dits « précoces ».

Aujourd'hui, on assiste à une désaffection progressive pour les études comportementales (perception, cognition, motricité) sur la petite enfance, vraisemblablement pour des raisons d'équipement et de surfaces nécessaires à de telles études. Ceci est spécifique à la France, car nous avons les connaissances permettant de déterminer les signes précoces de certaines pathologies et pas uniquement à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Il existe des études épidémiologiques qui permettent de suivre des enfants présen-

tant dès la naissance un risque de développement (*voir* les études sur les prématurés). Il serait nécessaire d'élargir de telles études. Les recherches longitudinales demeurent néanmoins rares, parce que coûteuses.

Parmi les unités qui travaillent sur le développement des fonctions cognitives, on peut citer le Groupe d'Imagerie Neurofonctionnelle, UMR 6194, Caen ; le Laboratoire de Psychologie de la Perception, CNRS FRE 2929, Paris ; le Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, UMR 5105, Grenoble ; le laboratoire Cognition Humaine et Artificielle, EA 4004, Paris et Saint-Denis. Le Laboratoire Vulnérabilité, Adaptation et Psychopathologie (UMR 7593, Paris) a centré certaines de ses études sur l'autisme.

#### La psycholinguistique

*La psycholinguistique* développementale bénéficie clairement des avancées de la recherche sur le traitement de l'écrit chez l'adulte. La France est devenue l'un des pays majeurs pour les modèles de l'accès au lexique mental, en production comme en compréhension. Les travaux ont permis l'élaboration de modèles psycholinguistiques de la lecture des mots isolés qui simulent bien les performances des sujets sains ou cérébrolésés. Des études de neuroimagerie ont permis la mise en évidence d'aires spécifiques pour le traitement de la forme visuelle des mots. À l'heure actuelle, les modèles du sujet adulte sont envisagés du point de vue du développement du langage chez l'enfant, en considérant en particulier les causes, éventuellement génétique, de certains troubles du développement. Des projets nationaux et européens sont en cours sur ces sujets. L'étude du *développement précoce du langage oral* demeure aussi un point fort des recherches en France. Des travaux ont ainsi mis en évidence la sensibilité des bébés aux propriétés rythmiques qui peuvent distinguer les langues. Les regroupements prosodiques pourraient constituer une base essentielle de la distinction entre les « petits » mots grammaticaux et les autres mots. De même, les travaux sur les capacités d'apprentissage implicite sug-

gèrent que l'isolement des mots dans la parole entendue pourrait s'appuyer sur des mécanismes simples d'extraction de régularités. Les travaux de psychologie du langage sont moins développés concernant la compréhension des phrases chez l'adulte, même si les phénomènes d'accord entre nom et verbe, ou le traitement de certaines constructions grammaticales sont envisagés par certains chercheurs. Il est souhaitable que ce domaine continue d'être fertilisé par des interactions entre linguistes et psychologues. De même, les travaux sur la compréhension du discours ou du texte semblent moins représentés en France que dans le monde anglo-saxon.

Concernant la psycholinguistique de l'adulte ou de l'enfant, de nombreux laboratoires apportent des contributions, il convient de citer les unités suivantes : Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 6146, Marseille ; Laboratoire de Sciences Cognitives et de Psycholinguistique, UMR 8554, Paris ; Laboratoire de Psychologie et Neurosciences Cognitives, CNRS FRE 2987, Boulogne ; Unité de Neuroimagerie Cognitive INSERM U 562, Orsay ; Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, EA 3082, Lyon. Mais une liste complète des unités travaillant sur les troubles d'apprentissage du langage écrit chez l'enfant devrait aussi mentionner de nombreuses équipes insérées dans des laboratoires de psychologie cognitive. Cette thématique est alors plutôt étudiée en adoptant une approche neurocognitive, comme au Laboratoire de Psychologie et Neurocognition (UMR 5105, Grenoble), ou en considérant le développement de la lecture comme un type spécifique d'apprentissage, comme au Laboratoire d'Étude de l'Apprentissage et du Développement (UMR 5022, Dijon) et au Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive (UMR 6024, Clermont-Ferrand).

### 3.2 MÉMOIRE, APPRENTISSAGES, RAISONNEMENT

L'étude de *la mémoire et de l'apprentissage* reste un des thèmes majeurs de la psy-

chologie scientifique, en particulier dans les citées à la fin du paragraphe précédent (UMR 5022 et 6024). Les chercheurs français ont contribué à l'émergence des travaux actuels sur l'apprentissage et la mémoire implicites en étant au cœur des débats les plus vifs sur ces questions. Ce type d'apprentissage est particulièrement important en ce qu'il opère à l'insu du sujet et ne semble dépendre pour son efficacité ni de l'âge, ni du niveau intellectuel des individus. La recherche française a permis une avancée importante de ce domaine en proposant des modèles théoriques originaux qui permettent de repenser les rapports entre conscience, mémoire et apprentissage. Il convient de noter que les travaux ne portent plus seulement sur l'apprentissage de la lecture, mais envisagent aussi le calcul ou la musique. De même, des chercheurs français ont fait une percée dans l'étude de la mémoire de travail. Il s'agit d'un système cognitif chargé du maintien et du traitement simultané de l'information. Proposé en 1974, ce concept a rencontré un succès considérable et se substitue peu à peu à la notion plus vague d'intelligence. La recherche française s'est illustrée en y introduisant une dimension temporelle jusqu'ici négligée. L'un des domaines d'application des recherches sur la mémoire de travail concerne le développement du raisonnement chez l'enfant. En effet, dans la mesure où ce système de mémoire permet de maintenir des représentations transitoires envisagées pendant le raisonnement, l'accroissement de sa capacité peut induire une amélioration de la résolution de problèmes. Une autre approche du raisonnement s'inspire directement de la « théorie de la pertinence ». Cette théorie linguistique a d'abord éclairé le rôle du contexte dans la communication. En France, des chercheurs ont montré que cette théorie permettait de prédire des erreurs de raisonnement survenant dans des contextes spécifiques. Il s'agit d'ailleurs d'un cas remarquable d'interaction entre Sciences Humaines et Sociales et Sciences du Vivant. On note un développement du champ de la pragmatique en psychologie et en neuropsychologie. Sur ce point le Laboratoire sur le Langage, le Cerveau et la Cognition (UMR 5230, Bron) ainsi qu'une équipe du Laboratoire

Langage, Mémoire et Développement Cognitif (UMR 6215, Poitiers) apportent des contributions spécifiques.

Plus généralement, les psychologues français demeurent très actifs dans le domaine des apprentissages scolaires et de la psychologie de l'éducation, non seulement en ce qui concerne la lecture comme nous l'avons dit, mais aussi dans celui du calcul et de l'orthographe où leurs travaux sont fréquemment cités. On notera cependant que, contrairement à d'autres pays, les données de la psychologie sont insuffisamment prises en compte dans l'établissement des progressions pédagogiques, où le débat idéologique est d'autant plus vif que les données de la recherche y sont ignorées.

La mémorisation des informations visuo-spatiales fait l'objet d'études spécifiques du Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (UPR 3251, Orsay) qui constitue une des interfaces cruciales entre Sciences du Vivant et Sciences et Technologies de l'Ingénierie et de l'Information, nous y reviendrons plus loin en abordant le champ de l'ergonomie cognitive. Les aspects neuropsychologiques de la mémoire sont également abordés par des équipes comme le Laboratoire de Neuropsychologie Cognitive et Neuroanatomie Fonctionnelle de la Mémoire Humaine (INSERM EMI 0218, Caen).

### **3.3 RÉGULATION SOCIALE DU FONCTIONNEMENT COGNITIF, ERGONOMIE COGNITIVE**

L'influence du contexte, ou de la situation, sur le fonctionnement cognitif devient une préoccupation importante. Ce type de recherche invite à réviser nos connaissances sur l'homme « cognitif » en interaction, en tenant compte des dimensions proprement sociales qui régissent ces interactions, mais qui peuvent aussi déterminer les performances et les évaluations des êtres humains.

Les comportements et leurs processus cognitifs et neurophysiologiques sous-jacents sont ancrés dans des fonctionnements sociaux qui ont une grande importance chez l'animal, mais aussi chez l'homme. Or cette dimension sociale demeure quasi absente de la psychologie cognitive, alors même que l'on assiste au plan international à un formidable 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 autre branche de la psychologie étudie :

1. la manière dont le sujet humain organise mentalement son environnement social, c'est-à-dire comment il encode, stocke et récupère l'information sur cet environnement ;
2. les conséquences de cette organisation avec ses composantes affectives et émotionnelles sur l'interaction sociale ;
3. et de manière complémentaire, l'influence de cette interaction sur les fonctionnements cognitifs eux-mêmes (mémoire, attention, langage, etc.).

Ainsi, des recherches récentes ont mis en évidence une régulation sociale du fonctionnement cognitif. Un individu peut réaliser différemment une même épreuve si celle-ci est présentée comme une évaluation de ses capacités de dessin, ou comme une épreuve de géométrie. Les connaissances sur soi et sur les attentes d'autrui peuvent ainsi modifier les performances cognitives. Les travaux de psychologie sociale mettent aussi en évidence les mécanismes complexes qui régulent l'identité, comme l'appartenance à un groupe avantagé ou non, ou la valorisation de la similarité entre les membres d'un même groupe. Ces travaux ont des répercussions pratiques dans des champs très divers allant de la pédagogie (comment évaluer les performances d'enfants appartenant à des milieux différents) jusqu'à l'expertise judiciaire (comment tenir compte des facteurs sociaux influençant les témoignages).

Partie intégrante des sciences cognitives, et forte d'importantes implications sociétales

dans les domaines de l'éducation, de la santé et du travail, la recherche dans ce secteur mérite d'être encouragée. Elle l'est partout ailleurs en Europe et aux États-Unis depuis 20 ans, et plus encore aujourd'hui en raison de son importance dans de nombreux programmes interdisciplinaires impliquant par exemple les neurosciences intégratives, la sociologie ou l'économie. Deux laboratoires comportent des équipes centrées sur la psychologie sociale : le Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 6146, Marseille ; et le Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive, UMR 6024, Clermont-Ferrand. Mais d'autres unités voient émerger des équipes dans ce domaine. Le laboratoire Laboratoire Cognition, Langues, Langages, Ergonomie (UMR 5263, Toulouse) intègre une équipe « Contexte social et régulation de la cognition » qui apporte aussi des contributions importantes en psychologie sociale.

L'étude du fonctionnement cognitif dans des situations spécifiques (travail, conduite automobile, recherche sur le Web, etc.) est aussi développée dans notre pays. Aujourd'hui, les individus sont conduits quotidiennement à dialoguer par l'intermédiaire d'ordinateurs, de nombreux services utilisent des serveurs pour interagir avec des usagers. Les travaux de psychologie conduits dans des laboratoires français permettent de tenir compte des résultats fondamentaux pour améliorer les interactions homme-machine. **L'ergonomie cognitive** reste l'un des domaines essentiels où les recherches de psychologie cognitive trouvent des applications, et se fait dans de nombreux laboratoires parmi lesquels on peut citer le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur UPR 3251, Orsay ; le Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, UMR 5105, Grenoble ; l'Équipe « Psychologie, Cognition et Technologie » au sein de l'Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes, UMR 6597 Nantes ; le Laboratoire Langage, Mémoire et Développement Cognitif, UMR 6215, Poitiers ; le Laboratoire Cognition, Langues, Langages, Ergonomie, UMR 5263, Toulouse ; le laboratoire Cognition Humaine et Artificielle, EA 4004, Paris et Saint-Denis.

Les interfaces homme-machine sont aussi étudiées dans le cadre des recherches en **psychopathologie**. Ainsi, des outils ont été mis au point pour diagnostiquer et soigner différentes pathologies en utilisant la réalité virtuelle pour aider certains phobiques à surmonter leurs troubles. Mais des travaux français en psychopathologie ont aussi apporté un éclairage nouveau sur la schizophrénie, par exemple en mettant en évidence les mécanismes impliqués dans les troubles de l'attribution d'intention. (Laboratoire Vulnérabilité, Adaptation et Psychopathologie, UMR 7593, Paris ; Équipe « Psychopathologie de l'intention » au sein du Centre de Neurosciences Cognitive, UMR 5229, Bron). Les thèmes abordés jusqu'ici concernent surtout des fonctions cognitives de haut niveau, mais il convient de noter que notre pays est aussi reconnu sur le plan international pour ses travaux sur la perception.

### 3.4 PSYCHOPHYSIQUE ET PERCEPTION

Les études psychologiques sur la perception réalisées en France concernent l'ensemble des modalités sensorielles. D'un point de vue strictement psychologique, ces études sont intimement liées au thème de l'attention, comme l'illustrent les travaux sur le « change blindness » qui montrent que certains changements de la scène visuelle restent inaperçus, le thème de la détection des changements est également abordé en audition. En outre, au niveau théorique, la modélisation Bayésienne gagne du terrain en particulier dans le domaine de la vision, mais aussi pour théoriser certains phénomènes d'intégration entre plusieurs modalités sensorielles. Une tendance commune aux recherches sur la vision et l'audition concerne la volonté de réaliser des recherches sur la perception des « scènes naturelles » que celles-ci soient composées de stimuli visuels complexes, ou de plusieurs sources sonores (« cocktail-party »). Dans ce cadre, des travaux français ont montré une extraction rapide des

informations de basse fréquence qui fournissent un aperçu global de la structure de la scène visuelle. Cette première catégorisation est complétée par l'extraction plus lente des hautes fréquences spatiales, qui permet d'affiner, de valider ou d'infirmer la catégorisation perceptive initiale. Un autre aspect fortement développé dans notre pays concerne les applications en matière de prothèses (e.g., implants cochléaires pour l'audition) ou de dispositifs de suppléance sensorielle. Enfin, il convient de souligner que les travaux de psychologie de l'audition conduits dans notre pays concernent aussi bien les sons de l'environnement que la parole ou la musique.

Les travaux sur la perception ne se contentent pas d'examiner une sensibilité passive. Par exemple, la sensibilité tactile manuelle est étudiée conjointement avec la sensibilité kinesthésique lors des mouvements des doigts, pour aboutir à une compréhension plus complète des mécanismes impliqués dans l'appréhension des objets.

Mais notre pays reste en retrait tant en nombre d'unités qu'en nombre de chercheurs ou d'enseignants chercheurs. Par exemple, concernant la vision ou l'audition, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et les Pays-Bas ont de plus nombreux chercheurs que la France. Les chercheurs français de ces domaines se sont regroupés récemment pour constituer des groupements de recherche (GDR) interdisciplinaires associant psychologues, modélisateurs et neuroscientifiques.

À l'heure actuelle, parmi les laboratoires ou équipes français travaillant sur la vision, on peut mentionner le Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, UMR 5105, Grenoble ; le Laboratoire de Neurosciences Fonctionnelles et Pathologies, UMR 8160, Lille ; l'Équipe Cognition et Motricité de l'Unité de Recherche sur l'Évolution du Comportement et l'Apprentissage, EA 1059, Lille ; l'Unité INSERM 371 Cerveau et Vision (Bron) ; l'Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, UMR 6193, Marseille ; le Laboratoire de Psychologie de la Perception, CNRS FRE 2929, Paris ; le Laboratoire de Neurosciences Cognitives et Imagerie Cérébrale UPR 640, Paris ; l'Équipe

Vision et Apparence du Centre de Recherche sur la Conservation des Collections du Muséum National d'Histoire Naturelle, UMR 7188, Paris ; le Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, UMR 7152, Paris ; le Centre de Recherche Cerveau et Cognition, UMR 5549, Toulouse.

De même, concernant la perception auditive, on peut mentionner le Laboratoire de Psychologie de la Perception, CNRS FRE 2929, Paris ; le Laboratoire d'Étude du Développement et de l'Apprentissage, UMR 5022, Dijon ; le Laboratoire Mouvement Adaptation Cognition, UMR 5227, Bordeaux ; le Centre de Recherche Cerveau et Cognition, UMR 5549 ; l'Équipe Neuropsychologie et Cognition Auditive, JE 2497 Université Lille 3 ; le Laboratoire Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition, UMR 5020, Lyon ; le Laboratoire de Neurophysiologie et de Neuropsychologie, INSERM U 751, Marseille ; le Laboratoire de Physiologie Neurovégétative, UMR 6153, Marseille ; le Laboratoire de Neurobiologie Intégrative et Adaptative, UMR 6149, Marseille ; le Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique, UMR 8554, Paris ; l'Institut de la Communication Parlée, UMR 5009, Grenoble ; le Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 6146, Marseille ; le Laboratoire de Phonétique et Phonologie, UMR 7018, Paris.

### 3.5 VIEILLISSEMENT COGNITIF

Pour finir cette synthèse consacrée aux recherches en psychologie, il est intéressant de revenir sur le thème initial du développement. L'individu connaît des transformations majeures de son fonctionnement psychologique pendant l'enfance et l'adolescence, mais une autre période de la vie est marquée par des modifications fondamentales. La baisse du taux moyen de fécondité et l'amélioration continue des conditions de vie aux cours des dernières décennies, qui favorisent l'allongement de la durée de vie font du **vieillessement** une préoccupation majeure de ce début de siècle. La singularité de ce phénomène

réside dans son caractère soudain, qui fait que de nombreux pays ne semblent pas s'y être préparé, ni l'avoir anticipé par des politiques appropriées. Les conséquences de la canicule de l'été 2004 en France en sont une illustration frappante. Le vieillissement touche l'ensemble des fonctions de l'homme, qu'elles soient physiques, mentales ou sociales. Les travaux de biologie du vieillissement montrent qu'il touche tous les systèmes de l'organisme d'une manière dynamique, indépendamment de l'espèce considérée. De la cellule jusqu'aux niveaux les plus intégrés, tous les niveaux du vivant sont ainsi affectés. Des études réalisées en France ont permis de mettre en évidence un effet spécifique du vieillissement sur certaines fonctions de mémoire et d'apprentissage.

Il faut cependant souligner le caractère différentiel de l'impact du vieillissement. Le milieu social et les conditions de vie restent déterminants. Cela marque le caractère multifactoriel du vieillissement. Il y'a d'une part le processus du vieillissement, lié à la biologie de l'humain dans son individualité, et il y'a d'autre part les influences liées à l'environnement social et aux conditions de vie (travail, accès aux soins médicaux, au droit(s), etc.). Il convient aussi de distinguer ce qui ressort du vieillissement cognitif « normal » de ce qui ressort de processus démentiels pathologiques.

L'importance biologique et sociétale du vieillissement argue d'une manière irréfutable en faveur de recherches interdisciplinaires. C'est la seule garantie pour avancer de front face à un phénomène complexe, dont la compréhension nécessite une politique volontariste aux actions pérennes et significatives. Parmi les principales équipes de recherche impliquées en France, on peut citer l'Équipe Vieillesse du Laboratoire Langage, Mémoire et Développement Cognitif, UMR 6215, Poitiers ; l'Équipe Plasticité Cognitive du Laboratoire de Psychologie Cognitive, UMR 6146, Marseille ; le Laboratoire de Psychologie Expérimentale et Cognitive de la Mémoire et de la Cognition, EA 3021, Montpellier ; le Laboratoire de Psychologie Expérimentale Quantitative, EA 1189, Montpellier.

### **3.6 CONCLUSIONS SUR LA PSYCHOLOGIE**

En conclusion, notre pays a su développer des programmes originaux en psychologie cognitive, en particulier concernant la psycholinguistique du lexique, les compétences numériques, la cognition motrice, la mémoire implicite, la perception visuelle ou auditive, et la conscience. Des domaines connaissent aujourd'hui un essor important : la psychologie sociale, l'ergonomie cognitive, la psychologie du vieillissement. La neuroimagerie des fonctions cognitives, longtemps délaissée commence à se développer en France, mais de nombreux chercheurs mettent en garde contre un développement de ce domaine qui se ferait au détriment des recherches comportementales. Il est clair en effet que le foisonnement des recherches d'imagerie fonctionnelle a notamment pu se faire grâce aux progrès importants dans la mise au point de paradigmes expérimentaux robustes, qui permettent d'inférer l'organisation des processus cognitifs à partir de données comportementales. De même, les implications pédagogiques des recherches fondamentales sur l'apprentissage invitent à promouvoir des relations plus fortes entre le monde enseignant et celui de la recherche.

## **4 – LES NEUROSCIENCES INTÉGRATIVES**

### **4.1 UN EXEMPLE DE DÉCLOISONNEMENT DISCIPLINAIRE ET MÉTHODOLOGIQUE**

La communauté des chercheurs en neurosciences intégratives est attachée à l'interdisciplinarité de la section 27, qu'elle pratique

depuis de nombreuses années. Cette interdisciplinarité a permis aux recherches pratiquées dans la section de s'affranchir de plusieurs cloisonnements disciplinaires et méthodologiques, et de tirer grand profit des avancées conceptuelles et technologiques réalisées dans d'autres domaines scientifiques.

Ainsi, la compréhension du fonctionnement du cerveau et de la genèse des grandes fonctions mentales (la perception, la planification et l'exécution de l'action, l'apprentissage et la mémoire, l'attention, le raisonnement, la motivation et les émotions, pour ne citer que quelques exemples) repose sur des approches associant les études comportementales à de nombreuses techniques (génomique, pharmacologie, neurophysiologie, imagerie fonctionnelle, mathématiques et modélisation), et transcende ainsi les habituelles frontières entre disciplines. Un des grands défis des neurosciences intégratives est de comprendre les interactions entre différents niveaux d'analyse, depuis les niveaux moléculaire et cellulaire, les niveaux des micro-réseaux et macro-réseaux neuronaux et de leur plasticité, jusqu'à l'échelle de l'expression des fonctions supérieures du cerveau. Ce constat, dressé par la précédente mandature de la section (prospective 2003, section 29) reste aujourd'hui toujours vrai.

Les enjeux des neurosciences intégratives sont immenses, puisqu'il s'agit non seulement de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau en relation avec les processus mentaux, mais aussi de répondre au coût économique et social que représente aujourd'hui la prévalence des maladies mentales, l'incidence accrue des maladies neuro-dégénératives comme les maladies d'Alzheimer et de Parkinson, les désordres neurologiques, l'épilepsie, certaines pathologies comportementales (troubles anxieux, troubles du comportement alimentaire, conduites addictives, etc.), le traitement de la douleur et plus généralement le handicap, le développement et le vieillissement normaux et pathologiques (comme l'autisme, ou la dégénérescence maculaire liée à l'âge).

Pour aboutir à la conception de nouvelles approches thérapeutiques, les recher-

ches doivent avant tout déterminer comment **décrypter le code neural** en relation avec les fonctions cérébrales étudiées dans les laboratoires de la section 27, mais aussi comment le cerveau se construit, à la fois du point de vue **génétique et épigénétique**, comment il vieillit et comment il se déconstruit dans certaines pathologies.

Pour relever ces défis, **les recherches de la section font appel à des méthodes de plus en plus sophistiquées** (imagerie médicale, imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), imagerie optique, électrophysiologie multi-canaux, etc.) qui génèrent d'énormes quantités de données difficilement exploitables de manière optimale sans le recours à des méthodes sophistiquées de stockage et d'analyse. Les interactions avec les domaines de l'informatique, de la physique et des mathématiques appliquées deviennent donc indispensables.

La connaissance de plus en plus approfondie des génomes, les développements de la post-génomique fonctionnelle et de la **biologie cellulaire et moléculaire du neurone** permettent et permettront des « sauts » de plus en plus importants du niveau le plus élémentaire à celui de la fonction, ce qui nécessitera des interactions réciproques entre professionnels et spécialistes des différents niveaux d'analyse.

La **modélisation** à différents niveaux est également de plus en plus utilisée dans les laboratoires relevant de la section 27 pour fournir de nouveaux modèles, de nouveaux cadres conceptuels et de nouveaux objets d'analyse. Ces modélisations, allant des modèles mathématiques, des réseaux formels de neuroinformatique jusqu'aux modèles de robotique et de réalité virtuelle nécessitent là aussi l'alliance de compétences diverses issues de différents champs disciplinaires.

Les recherches de la section doivent donc se renforcer autour des frontières méthodologiques et conceptuelles des neurosciences intégratives avec la génomique, la robotique, la physique et les mathématiques appliquées.

## 4.2 LE DÉCRYPTAGE DU CODE NEURAL : DES MICRO-RÉSEAUX AU MACRO-RÉSEAUX

Les recherches menées au sein de la section 27 ont pour objectif général l'étude des fonctions mentales et des comportements intégrés. Il s'agit donc de parvenir à relier le fonctionnement du cerveau à la pensée et au comportement. Chacun reconnaît maintenant que tout traitement d'information, même le plus élémentaire, est réalisé par des populations de neurones formant des réseaux fonctionnels et dynamiques. Pour décrypter le code neural, la recherche fondamentale menée dans le cadre de la section fait appel à la neurophysiologie chez l'animal et aux méthodes permettant de lire en temps réel l'activité neuronale d'un neurone unique mais aussi, grâce à des méthodes en constante évolution, l'activité de larges populations de neurones enregistrés simultanément.

Ces réseaux fonctionnels peuvent être d'assez petite taille (micro-réseaux) pour les comportements touchant à l'intégration sensori-motrice et pour certaines grandes fonctions (la locomotion, la respiration, la déglutition, le contrôle oculomoteur et postural) facilement quantifiables, dont la finalité comportementale est bien établie, et pour lesquelles on peut accéder de manière relativement aisée aux réseaux neuronaux qui les sous-tendent. D'autres grandes fonctions plus distribuées comme la vision, ou aux contours multiples comme la mémoire, la cognition, la motivation, les émotions, sont étudiées dans le cadre de réseaux neuronaux largement distribués dans différentes aires cérébrales, et mettent donc en jeu des méthodes d'analyse différentes.

### Les micro-réseaux de neurones : études *in vivo* et *in vitro*

Dans ce contexte, une vingtaine de chercheurs de la section s'intéressent à des comportements générés par des assemblées neuronales

de petite taille. Ces études associent généralement des travaux comportementaux ou électrophysiologiques sur l'animal vivant à des travaux menés *in vitro*, sur des préparations de tissu nerveux maintenu dans un liquide physiologique (tranches de moelle épinière, de tronc cérébral ou de cerveau, moelle épinière ou cerveau entier isolés). Du fait de la relative simplicité des réseaux neuronaux étudiés, ces recherches intègrent souvent une forte composante de modélisation à l'échelle du neurone ou du réseau.

Un concept fondamental issu de la recherche sur le contrôle moteur est que le système nerveux central possède la capacité endogène d'organiser la plupart des caractéristiques spatiales et temporelles d'un comportement simple et stéréotypé. Certains groupes discrets de neurones, qui sont capables de produire différents types de comportements rythmiques moteurs en l'absence d'informations sensorielles, ont été appelés des générateurs centraux de patrons («central pattern generators» des anglosaxons). Alors que cette notion a été longtemps limitée à la production de processus automatiques simples, comme la respiration et la locomotion, il apparaît maintenant que de nombreux réseaux corticaux ou sous-corticaux présentent des propriétés fonctionnelles similaires, notamment les circuits hippocampiques qui produisent les rythmes gamma et thêta et les réseaux de contrôle du cycle veille-sommeil. Une autre caractéristique des recherches sur les micro-réseaux est d'être souvent menées sur des réseaux en développement, du fait de la meilleure résistance *in vitro* des tissus jeunes.

Les recherches autour de ces thématiques se situent à l'interface avec la section 25, «Physiologie Moléculaire et Intégrative», dont un axe majeur est la physiologie des neurones et de la neurotransmission abordée à l'échelle cellulaire. La différence entre les deux sections se situe dans l'adoption par les chercheurs de la section 27 d'une démarche résolument comportementale, où les études *in vitro* sont guidées par l'observation et la quantification des comportements d'animaux vivants. Les recherches menées dans la section 25 s'arrêtent au fonctionnement du tissu nerveux, sauf peut-

être dans le cas des fonctions de respiration et de déglutition rattachées historiquement à la section 25 même dans leurs approches comportementales. Inversement, le contrôle oculomoteur et postural et la locomotion sont plutôt abordés par la section 27. Il est évident toutefois qu'un continuum existe entre ces deux approches, qui se manifeste par le fait que la plupart des chercheurs de la 27 qui travaillent dans ce domaine sont affectés à des laboratoires qui comprennent des chercheurs des deux sections, et sont eux-mêmes souvent rattachés simultanément aux deux sections.

Actuellement, les recherches menées sur les « micro-réseaux » *in vitro* concernent d'abord la locomotion avec l'UMR 6196 (Plasticité et Physio-Pathologie de la Motricité, Marseille), l'UMR 5227 (Mouvement Adaptation Cognition, Bordeaux), l'UMR 5228 (Centre de Neurosciences Intégratives et Cognitives, Bordeaux), l'UMR 7101 (Neurobiologie des Signaux Intercellulaires, Orsay), l'UMR 8119 (Laboratoire de Neurophysique et Physiologie, Paris), l'unité INSERM 862 (Institut François Magendie, Bordeaux). Plusieurs unités s'intéressent à la respiration et la déglutition, comme l'UPR 2216 (Neurobiologie Génétique et Intégrative, Gif-sur-Yvette), l'UMR 6153 (Physiologie Neurovégétative, Marseille), l'EA 3901 (Génétique Moléculaire Médicale, Amiens). Le contrôle oculomoteur et postural est abordé dans les UMR 6149 (Neurobiologie Intégrative et Adaptative, Marseille) et 7060 (Laboratoire de Neurobiologie des Réseaux Sensorimoteurs, Paris). Des recherches sur les réseaux de neurones de l'olfaction sont menées dans l'UMR 5020 (Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition, Lyon). Enfin, les circuits hippocampiques et corticaux sont abordés sous l'angle « *in vivo* – *in vitro* » dans l'UMR 5167 (Physiopathologie des Réseaux Neuronaux du Cycle Veille-Sommeil, Lyon), l'UPR 2191 (Unité de Neurosciences Intégratives et Computationnelles, Gif-sur-Yvette), l'unité INSERM 667 (Dynamique et Physiopathologie des Réseaux Neuronaux, Paris).

En ce qui concerne les modèles animaux utilisés, ce sont le plus souvent des rongeurs

(rat, cobaye, souris), mais aussi la grenouille, le xénope, la lamproie ou les invertébrés comme le homard ou l'aplysie. Les dernières années ont vu de nombreux chercheurs se tourner vers la souris, qui seule ou presque permet l'utilisation des techniques de mutagenèse et de knock-out, même si des xénopes transgéniques sont en cours de développement. Inversement, les recherches sur les invertébrés, historiquement importantes dans notre pays (laboratoires CNRS d'Arcachon et de Marseille), ont quasiment disparu malgré tout l'intérêt de ces modèles.

Du côté des techniques d'études, on constate une évolution dans deux directions. D'une part, on assiste à une progressive sophistication des études comportementales, qui devrait mener à une ouverture vers l'éthologie, en lien notamment avec les besoins d'évaluation des conséquences des mutations induites chez les souris transgéniques. D'autre part, les enregistrements neuronaux *in vitro* sont de plus en plus obtenus à l'aide de techniques qui permettent la mise en place de réseaux mixtes entre neurones naturels et neurones ou conductances « artificiels » issus de la modélisation : technique du « dynamic clamp » qui permet d'ajouter ou retrancher artificiellement des conductances ou des entrées synaptiques aux neurones enregistrés, réseaux hybrides mi-naturels, mi-artificiels, dont une partie est récréée « *in silico* ». Ces nouvelles méthodes permettent de soumettre *in vitro* les réseaux étudiés à des situations plus proches de celles qui prévalent *in vivo*. Enfin, les techniques d'imagerie cellulaire de populations neuronales maintenues *in vitro* sont en plein développement, et devraient être de plus en plus utilisées au cours des prochaines années.

D'un point de vue prospectif, la section 27 doit veiller à accompagner ces évolutions, qui devraient permettre à terme d'approcher les bases moléculaires (canaux ioniques, récepteurs aux neurotransmetteurs) de ces comportements relativement simples à l'échelle du neurone isolé. Elle doit notamment promouvoir la mise en place d'équipes associant expérimentalistes et modélisateurs autour d'objectifs communs, mais aussi œuvrer à

renforcer les relations entre spécialistes des « micro-réseaux » et éthologistes, notamment de la souris.

### **Macro-réseaux de neurones, réseaux de neurones distribués**

Des avancées importantes ont été réalisées dans la recherche du code neural des grandes fonctions grâce aux progrès récents des méthodes d'enregistrement simultané d'ensembles de 50 à 150 neurones chez l'animal éveillé (rat, singe) en comportement, et à l'utilisation des méthodes d'imagerie (imagerie calcique, IRM fonctionnelle, etc.). Les recherches remettent en cause les schémas localisationnistes, mettent en valeur la sélectivité des activations neuronales pour certaines catégories d'informations (par exemple, les cellules de lieu et de direction dans l'hippocampe), mais aussi la coopérativité des différents réseaux neuronaux mis en jeu. Cette coopérativité est appréhendée par l'analyse des couplages temporels entre activités neuronales, des synchronisations et de la propagation des activités dans des réseaux distribués. Le succès de cette approche repose sur des enregistrements multi-sites et une analyse du signal performante. Elle devrait permettre de détecter la formation temporaire d'assemblées de neurones à des moments précis d'une tâche comportementale et aboutir ainsi à la formalisation de modèles dynamiques, qui reposeront sur les propriétés d'état des réseaux activés au cours de différentes phases du traitement de l'information.

Par exemple, les processus de codage des informations en mémoire sont abordés en imagerie calcique au Centre de Recherche sur la Cognition Animale (UMR 5169, Toulouse), pour déchiffrer les modifications des activations glomérulaires lors de l'apprentissage des odeurs par l'abeille. Ces processus de mémorisation sont approchés en électrophysiologie unitaire au Laboratoire de Neurobiologie de l'Apprentissage, de la Mémoire et de la Communication (UMR 8620, Orsay) pour étudier les modifications des champs récepteurs auditifs

chez le mammifère lors de l'apprentissage auditif, ou encore par l'analyse des potentiels de champs locaux dans le cadre de l'apprentissage des odeurs au laboratoire Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition (UMR 5020, Lyon). L'analyse des interactions entre plusieurs aires cérébrales est menée grâce à l'enregistrement des activités unitaires au sein de plusieurs structures (hippocampe, cortex frontal, ganglions de la base) lors des activités de mémoire et de navigation spatiale, par exemple au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, (CNRS UMR 7152, Paris) au Laboratoire de Neurobiologie de la Cognition (CNRS UMR 6155, Marseille) au Centre de Neurosciences Intégratives et Cognitives (UMR 5228, Bordeaux). Les activités neuronales unitaires corticales et leur modulation lors des activités de mémorisation olfactive étaient au centre d'autres travaux menés au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (UMR 7152, Paris).

Le rôle du cortex frontal dans les processus d'extinction de la mémoire et dans les processus exécutifs est abordé à l'Institut Cellule Souche et Cerveau (Unité INSERM 846, Bron), au Laboratoire Mouvement Adaptation Cognition (UMR 5227, Bordeaux) sur le singe et au Laboratoire de Neurobiologie Comportementale (EA 2674) de l'Université de Nice chez le rat. Enfin, les relations entre l'activité des réseaux et les processus de plasticité sont étudiées au sein du Laboratoire de Neurobiologie de l'Apprentissage, de la Mémoire et de la Communication (UMR 8620, Orsay).

La plasticité des représentations sensorimotrices, au cours de l'apprentissage ou pendant l'adaptation à un contexte nouveau, fait également l'objet d'étude dans plusieurs équipes. Ainsi, chez le singe, on peut citer les recherches en électrophysiologie dont le but est de comprendre les modifications de la dynamique neuronale en relation avec l'adaptation à un contexte temporel menées à l'Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée (UMR 6193, Marseille). D'autres recherches s'intéressent aux influences motivationnelles de la récompense, aux mécanismes qui sous-tendent différentes modalités d'apprentissage (Labora-

toire de Neurobiologie de la Cognition, UMR 6155 Marseille ; Laboratoire Mouvement Adaptation Cognition, UMR 5227 Bordeaux), aux modulations liées aux besoins attentionnels de la tâche (Centre de Neurosciences Cognitive, UMR 5229, Lyon), ou encore à l'apprentissage de nouvelles associations sensori-motrices (Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, UMR 6193, Marseille).

De nombreuses équipes s'intéressent également aux réseaux neuronaux impliqués dans la perception et/ou l'action et son contrôle cognitif. Ainsi, plusieurs chercheurs du Centre de Recherche Cerveau et Cognition (UMR 5549, Toulouse) étudient la catégorisation et l'analyse visuelles des scènes naturelles, et une équipe de l'Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée (UMR 6193, Marseille) étudie la poursuite oculaire et le rôle des saccades dans le traitement des informations visuelles. Les interactions entre perceptions temporelle, spatiale et visuelle et leurs influences sur le comportement sont au centre des thématiques du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (UMR 7152, Paris).

Ce tissu de compétences favorise l'établissement de nombreuses synergies. Compte-tenu de la complexité intrinsèque des différents processus de codage et de leurs interrelations, mais aussi de la multi-dimensionalité des fonctions étudiées, les avancées significatives dans la compréhension du code neural reposeront au moins en partie sur l'apport des méthodes et des concepts de la modélisation et des neurosciences computationnelles.

### 4.3 DU GÈNE À LA FONCTION

Les progrès dans le domaine des interactions gène-comportement reposeront sur une approche pluridisciplinaire combinant les méthodes de la biologie moléculaire, de la neurophysiologie, et de la psychologie expérimentale. Dans le cadre de la post-génomique fonctionnelle, la connaissance de plus en plus approfondie des génomes a ouvert de nou-

veaux défis en neurosciences, qui vont de l'identification de la fonction des gènes et protéines neuronales au développement d'outils de diagnostic et de médicaments. Les projets mettant en jeu les acquis de la génomique au service de la compréhension des fonctions du cerveau devraient améliorer la prise en charge de nombreuses maladies neurologiques et psychiatriques. Les enjeux sont considérables, tant sur le plan fondamental pour comprendre la spécificité de l'être humain que sur le plan clinique, notamment pour les maladies mentales liées à des facteurs héréditaires.

Ainsi, l'utilisation de modèles génétiques murins (mutations spontanées et animaux transgéniques) et la sélection de lignées spécifiques ont autorisé une analyse post-génomique pour déterminer le(s) fonction(s) de certains gènes lors de différents processus. Les relations entre le comportement et les mécanismes de l'intégration d'information à l'échelle synaptique et les liens avec la plasticité synaptique (potentialisation et dépression à long terme) et sa modulation, ou avec l'excitabilité cellulaire normale et pathologique (épilepsie) sont étudiées dans plusieurs unités (Neurobiologie des Processus Adaptatifs, UMR 7102, Paris ; Laboratoire de Neurobiologie Intégrative et Adaptative, UMR 6149, Marseille ; Laboratoire de Neurobiologie de la Mémoire, de l'Apprentissage et de la Communication, UMR 8620, Orsay ; Laboratoire de Neurobiologie, EA 2633, Orléans, Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, UMR 7152, Paris). L'analyse de l'implication de différents types de récepteurs, par l'utilisation d'animaux knock-out ou knock-in ou de lignées génétiques mutantes, permet de comprendre et d'affiner le rôle des grands systèmes de neurotransmission lors de maladies neuro-dégénératives de type Parkinson, Huntington ou Alzheimer (Laboratoire de Neurobiologie de la Cognition, UMR 6155, Marseille ; Laboratoire de Neurobiologie Intégrative et Adaptative, UMR 6149, Marseille ; Laboratoire de Neurobiologie de la Mémoire, de l'Apprentissage et de la Communication, UMR 8620, Orsay), ainsi que leur rôle dans le contrôle de la douleur ou de processus plus complexes comme les processus addictifs et les fonctions

cognitives et émotionnelles (Institut de Physiologie et Biologie Cellulaire, UMR 6187, Poitiers ; Centre de Neurosciences Intégratives et Cognitives, UMR 5228, Bordeaux).

L'intégration de l'information sensorielle dans le système olfactif et l'action de certaines molécules dans la régulation alimentaire (orexine, leptine) sont abordées chez les animaux normaux et génétiquement obèses (Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition, UMR 5020, Lyon). Enfin, l'utilisation des animaux transgéniques et l'identification à large échelle de gènes ont permis de montrer l'influence des interactions gènes/environnement sur la mémoire (Centre de Recherche sur la Cognition Animale, UMR 5169, Toulouse), le développement des maladies neuro-dégénératives et la vulnérabilité aux drogues (Institut de Physiologie et Biologie Cellulaire, UMR 6187, Poitiers). Ce dernier point illustre l'attention toute particulière qu'il convient d'accorder à l'épigénétique à savoir à la manière dont l'environnement va moduler l'expression génique (sans altérer le code génétique) et par la même certains comportements.

#### **4.4 DES MÉCANISMES MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES AU COMPORTEMENT**

Les approches neurophysiologiques et les nouvelles méthodes d'imagerie cellulaire ont permis des percées spectaculaires dans l'analyse des mécanismes de communication intercellulaire et de plasticité neuronale impliqués dans le comportement. Ces approches ont permis l'identification de certaines voies de signalisation neuronale, qui vont de l'activation des récepteurs et canaux ioniques au remodelage des réseaux neuronaux impliqués dans les comportements, en passant par les messagers intracellulaires et intercellulaires, les cascades d'activation de protéines neuronales et les régulations de gènes impliqués. Des travaux de ce type ont été menés en France sur la mémoire (Laboratoire de Neurobiologie de la

Mémoire, de l'Apprentissage et de la Communication, UMR 8620, Orsay ; Centre de Recherche sur la Cognition Animale, UMR 5169, Toulouse ; Centre de Neurosciences Intégratives et Cognitives, UMR 5228, Bordeaux), sur la motricité et ses pathologies (Laboratoire Mouvement Adaptation Cognition, UMR 5227 Bordeaux ; Laboratoire de Neurobiologie de la Cognition, UMR 6155, Marseille), sur la chimioréception (Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition, UMR 5020, Lyon ; Centre des Sciences du Goût, UMR 5170, Dijon), sur l'addiction aux drogues (Laboratoire Mouvement Adaptation Cognition, UMR 5227 Bordeaux).

Par exemple, l'étude de modèles murins obtenus par la mise en œuvre des techniques de transgénèse, de mutagenèse, ou les outils d'analyse génomique et protéomique à grande échelle et d'intervention sur des cibles moléculaires, sont devenus incontournables pour la compréhension des mécanismes moléculaires et génétiques complexes qui contrôlent la genèse, le fonctionnement et les adaptations des réseaux neuronaux par l'expérience. Le développement d'outils pharmacologiques de plus en plus spécifiques et précis devrait permettre également une meilleure compréhension de l'implication de certains systèmes neurochimiques dans les comportements et mener à de nouvelles pistes thérapeutiques.

#### **4.5 INTERACTION CERVEAU-MACHINE ET IMAGERIE FONCTIONNELLE**

Les neurosciences intégratives sont au cœur d'une révolution dans le domaine de l'interface cerveau machine, qui donne aujourd'hui de réels espoirs en termes d'application mais aussi en termes de recherche fondamentale. Les recherches menées tentent d'une part de faire communiquer le cerveau avec divers outils artificiels (notamment des prothèses), d'autre part d'augmenter la précision du geste par différents canaux perceptifs qui bénéficient

de la réalité augmentée, ces canaux se substituant en contrôle aux canaux traditionnels de la tâche. Les avancées dans ce domaine en plein essor reposeront sur d'une part le décryptage du code neural, d'autre part l'interfaçage entre la neurophysiologie, l'informatique et la robotique.

Enfin, un domaine particulièrement porteur en neurosciences intégratives est celui de l'imagerie fonctionnelle chez l'animal. Les recherches menées depuis plus d'un demi-siècle dans notre domaine ont permis d'accumuler des connaissances d'une richesse inestimable sur le fonctionnement du cerveau animal, notamment celui du primate non humain. Le développement des méthodes d'imagerie chez l'homme, chez le primate non humain et chez le petit animal ouvre la possibilité d'obtenir des cartes d'activation cérébrales en relation avec le comportement, mais aussi de combiner les mesures fonctionnelles et les techniques invasives (neurophysiologie, pharmacologie, etc.), ce qui permettra de développer de meilleurs modèles animaux de pathologies du cerveau. La tendance aujourd'hui est de penser les centres d'imagerie en fonction de cette nouvelle exigence d'accessibilité à la fois à l'homme et à l'animal.

Les neurosciences de la cognition sociale sont abordées par les méthodes d'imagerie et cherchent à déterminer les bases neuronales

des interactions sociales normales ou pathologiques chez l'homme et l'animal, notamment à l'Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, UMR 6193, Marseille.

## ANNEXE

### ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

|        |   |
|--------|---|
| CNRS   | Centre National de la Recherche Scientifique              |
| EA     | Équipe d'Accueil (universitaire)                          |
| FRE    | Formation de Recherche en Evolution (CNRS)                |
| GDR    | Groupement de Recherche (CNRS)                            |
| INRA   | Institut National de la Recherche Agronomique             |
| INSERM | Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale |
| IRMf   | Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle           |
| UMR    | Unité Mixte de Recherche (CNRS)                           |

