

29

FONCTIONS MENTALES NEUROSCIENCES INTÉGRATIVES COMPORTEMENTS

CLAUDE DESTRADE

Président de la section

MICHEL IMBERT

Rapporteur

Mireille Bastien

Claude Bonnet

Lionel Collet

Alain Dejean

Farid El Massioui

Michel Fayol

Jacques Gervet

Anne-Yvonne Jacquet

Roland Jouvent

Michèle Kail

Michel Kreutzer

Serge Laroche

Jean-Claude Marquié

Fernando Perez-Diaz

Marie-France Pichevin

Bruno Poucet

Claude Prablanc

Bruno Will

OUVERTURE

Relier le fonctionnement du cerveau à celui de la pensée et du comportement, en intégrant les caractéristiques et les pressions de l'environnement, est l'aventure dans laquelle s'engagent tous ceux qui se retrouvent au sein de la section 29. Les questions traditionnelles sur le fonctionnement de l'esprit, comme la perception, la planification et l'exécution de l'action, la mémoire, le raisonnement, la résolution de problèmes, la production et la compréhension du langage, la communication entre individus, les capacités cognitives du nouveau-né et leur développement, le comportement social, bref toutes les manifestations de l'intelligence naturelle, celle qui s'est développée dans le cadre de contraintes imposées par la sélection naturelle, sont abordées grâce à un appareil conceptuel puissant et des méthodes expérimentales éprouvées qui permettent d'en proposer des explications justiciables de vérifications empiriques.

La plupart des domaines de recherche décrits dans le présent Rapport de conjoncture illustrent à l'évidence ce programme ; certains autres peuvent au contraire sembler, à un lecteur pressé, en être fort éloignés : l'étude des récepteurs du glutamate ou le déplacement d'une fourmi, pour ne donner que deux exemples caractéristiques. Cependant, c'est parce qu'il s'intéresse d'abord à la mémoire et à l'apprentissage que le chercheur de la section 29

approchera l'analyse de ces récepteurs ; pour cela, il pourra utiliser les outils de la biologie cellulaire ou moléculaire, mais il le fera dans la mesure précisément où cette analyse lui permettra d'éclairer certains aspects de l'activité cognitive en question. De façon analogue, l'éthologiste de la section 29 insistera plutôt sur les aspects formels et généralisables de l'intelligence distribuée ou de l'émergence de propriétés collectives dans des sociétés d'insectes, que sur la valeur taxonomique de certains traits comportementaux qui retiendraient davantage l'attention des zoologistes.

Les champs d'application des disciplines qui relèvent de cette section sont nombreux et d'une importance capitale : santé et pathologies cérébrale et mentale bien évidemment (neuropsychologie et psychopathologie, vieillissement normal ou pathologique), organisation du travail (ergonomie), apprentissages scolaires et professionnels. Ces disciplines ont également un rôle éminent dans la mesure où elles permettent de mieux saisir l'impact sur la société de dysfonctionnements cognitifs ou cérébraux (approcher différemment l'échec scolaire ou la dépendance pharmacologique). En outre, l'étude des solutions "trouvées" au cours de l'évolution par un cerveau humain pour résoudre des tâches aussi complexes qu'identifier un visage en une fraction de seconde, ou de s'orienter dans une ville inconnue grâce à un plan tenu sous les yeux ou gardé dans sa tête, peut fournir de nouvelles idées utiles au développement de technologies avancées, vision par ordinateur ou robot mobile, pour nous en tenir aux exemples choisis.

Ainsi, on voit là comment la section 29 se place au carrefour de nombreux programmes interdisciplinaires, tels en particulier que les actions entreprises dans le cadre du GIS Sciences de la cognition qui intéressent au premier chef bon nombre des membres de la section 29.

INTRODUCTION

Les années 90 ont vu, avec l'ouverture de la décennie du cerveau et le développement institutionnel des sciences de la cognition, l'émergence dans notre communauté de nouvelles sphères d'interactions entre disciplines et l'apparition de nouvelles compétences qu'il faut continuer d'encourager. D'une manière générale, on assiste, après l'ère des emprunts d'outils et de méthodes, à un véritable travail d'unification de nature conceptuelle. Un exemple frappant est celui des neurosciences intégratives qui, en bénéficiant des avancées méthodologiques et conceptuelles de la biologie cellulaire et moléculaire d'un côté, de la neuropsychologie et de la psychologie cognitive de l'autre, ont permis le plein essor des démarches fondées sur l'intégration des niveaux d'analyse, de la cellule à l'organisme.

Les interrelations entre approches théorique et expérimentale – et donc entre théoriciens et expérimentateurs – se sont renforcées, largement sous l'effet de la multi-disciplinarisation de la recherche dans les sciences du vivant. Aux théories abstraites, verbalement formulées, se substituent de plus en plus des modélisations formelles, dont peuvent être dérivées des prédictions quantitatives, et qui sont parfois à l'origine de nouvelles méthodes d'analyse (par exemple les neurosciences dites "computationnelles", la dynamique des systèmes non linéaires, la théorie des systèmes). Ce rapprochement entre théorie et expérimentation reste cependant encore timide en France et doit donc continuer d'être promu.

Le décroisement des problématiques centrées sur des processus isolés pour les besoins de l'analyse s'est accéléré, faisant des mécanismes de couplage (par exemple, perception/action) un thème central. Moins conçu comme l'expression de processus élémentaires dans des architectures cognitives ou neuronales réductrices, le comportement, production macroscopique du vivant, redevient un niveau d'analyse et d'explication pertinent. Plusieurs équipes françaises sont représentatives de cette évolution conceptuelle. Le comportement étant aussi adaptation à un environnement, il intro-

duit une dimension écologique, le système nerveux étant le siège de processus de sélection destinés à accomplir des performances assurant la survie. Cette adaptation reflète le double aspect de l'activité cognitive, à la fois connaissance d'un organisme et connaissance d'un environnement.

Il faut souligner l'expansion et le succès que connaissent depuis quelques années les recherches développementales et les travaux neuro-psycho-pathologiques (parfois couplés) considérés comme participant d'une démarche paradigmatique permettant, à partir d'analyses menées chez le nouveau-né et l'enfant d'une part, chez les patients cérébrolésés d'autre part, d'approfondir notre compréhension des processus cognitifs et neurocognitifs chez l'adulte sain. Même s'ils tendent à devenir majoritaires, ces points de vue n'épuisent pas pour autant les préoccupations des chercheurs développementalistes, neuropsychologues et psychopathologistes pour lesquels l'ontogenèse, comme la neuroanatomie fonctionnelle – en particulier quand celle-ci a des retombées thérapeutiques – restent des thématiques de recherche pertinentes et fécondes. Dans le même ordre d'idées, l'explosion des démarches modélisatrices – en particulier néo-connexionnistes, mais pas seulement – et des techniques de simulation ne peut être réduite à l'avancée méthodologique qu'a permise le développement de l'informatique, mais pose des problèmes théoriques originaux, notamment à travers la question de la plausibilité neurobiologique et cognitive des modèles proposés.

Enfin, grâce aux spectaculaires progrès technologiques et méthodologiques dans les domaines de l'enregistrement et de l'analyse des paramètres cinématiques et dynamiques du mouvement, de la production des sons et des images de synthèse (environnements "virtuels"), de l'exploration non invasive des fonctions cérébrales, le primate humain n'est plus seulement l'espèce-cible à laquelle étaient souvent généralisés des résultats acquis avec des modèles animaux, mais devient celle sur laquelle l'expérimentation peut être directement menée. Ces progrès technologiques et méthodologiques ont également offert à la psychopathologie scientifique de nouveaux protocoles expérimentaux qui devraient permettre, à terme, des progrès sensibles dans la compréhension des

troubles mentaux. Ce recentrage sur l'homme, à la fois objet et sujet d'étude, sera largement dépendant des investissements qui seront consentis par les organismes de recherche en matière d'équipements lourds.

1 - PERCEPTION ET ACTION

Secteur historiquement et traditionnellement bien développé en France, il est représenté par au moins une dizaine de laboratoires dépendant de la section 29. Bien qu'étant, de ce fait, géographiquement dispersé et thématiquement diversifié, il recouvre, avec toutefois quelques lacunes, l'ensemble des problématiques occupant la scène internationale. Une évolution majeure dans ce domaine a été le décloisonnement des questions centrées respectivement sur les processus perceptifs et les processus moteurs, conduisant à faire des mécanismes du couplage perception/action un problème majeur (par exemple, le couplage vision/motricité oculaire, ou sensibilité haptique/activité manuelle exploratoire).

Le problème que pose l'intégration des sources multiples d'informations sensorielles (notamment visuelle, proprioceptive et tactile) est devenu un thème de recherche central. Il se pose d'une manière complémentaire dans la perspective de la psychologie cognitive, visant à mettre à jour le mécanisme de la perception catégorielle ou de l'extraction d'invariants perceptifs, et dans celle des neurosciences cognitives, face à la parcellisation et à la duplication des représentations neuronales au sein d'une même modalité sensorielle. L'enjeu ici est de comprendre comment s'intègrent au niveau intramodalitaire et sont fusionnées au niveau multimodalitaire les représentations des différents attributs d'un objet pour parvenir à l'unité perceptive de celui-ci. Par ailleurs les propriétés automatiques ou contrôlées des processus de sélection et de filtrage de l'information au niveau périphérique et des processus attentionnels qui vont, au niveau central, moduler les représentations perceptives en fonction du contexte et des objectifs comportementaux restent un thème de recherche crucial.

Les travaux sur les interrelations entre oculomotricité et perception visuelle, très bien représentés en France, ont tout spécialement bénéficié d'une approche multidisciplinaire – psychophysique, électrophysiologique, neuroanatomique et théorique – ainsi que des avancées technologiques dans le domaine des capteurs de signaux physiques et des outils de traitement de l'image. Les connaissances acquises sur les mécanismes d'intégration des informations visuelles au cours de l'exploration saccadique de l'environnement, de la perception stéréoscopique, du rôle du flux rétinien dans la perception du mouvement, sont, de plus, susceptibles de retombées importantes dans les domaines de la médecine, de l'ergonomie, de la robotique ou de l'aide aux handicapés.

Un renouveau d'intérêt est porté depuis quelques années à la dimension temporelle des comportements perceptivo-moteurs, sous l'effet convergent de l'introduction des concepts – émergence, attracteur, relaxation – de la théorie dynamique des systèmes non linéaires, qui font tous explicitement référence au temps, et de la signification fonctionnelle maintenant attribuée aux phénomènes de synchronisation des activités neuronales dans l'intégration des informations sensorielles multimodales et les transformations sensori-motrices.

Les recherches consacrées aux problèmes posés par les niveaux de représentation centrale de l'action, la planification de l'activité motrice et la programmation du mouvement constituent toujours un secteur très actif. Combinant méthodes d'approche invasives et non invasives, elles sont menées sur différentes espèces (hommes, primates non humains, rats, voire sur des réseaux neuronaux isolés), abordent un ensemble de problématiques diversifiées (mécanismes de l'imagerie motrice, de l'organisation des séquences de mouvements, des anticipations posturales, de la coordination bimanuelle, etc.) et font appel à un arsenal méthodologique et technologique très complet (imagerie cérébrale, électrophysiologie, réflexologie, électromyographie, neuro-pharmacologie, analyse cinématique du mouvement, chronométrie mentale, modélisation). Enfin, ce secteur reste le lieu de débats théoriques très actifs, où les concepts issus du connexionnisme, de la théorie des systèmes, de

la cybernétique et de la dynamique non linéaire, fertilisent en permanence les perspectives de recherche.

La mise en évidence, au cours des quinze dernières années, grâce à la combinaison des approches neurochimique, neurophysiologique et neuropsychologique, des phénomènes de plasticité synaptique à court terme a constitué une avancée scientifique de première importance. L'étude de ces phénomènes, fondamentaux non seulement pour comprendre les processus neuronaux à l'œuvre dans l'acquisition, le stockage et l'adaptabilité des liaisons sensori-motrices, mais encore pour exploiter à des fins de réhabilitation les possibilités de récupération fonctionnelle post-lésionnelle qu'ils impliquent, devrait faire l'objet d'efforts plus soutenus en France.

Enfin, quelques problématiques, bien qu'elles soient prises en charge par des chercheurs excellents mais peu nombreux, mériteraient de connaître un essor comparable à celui qu'elles ont sur le plan international. C'est le cas de certains secteurs de la psychophysique, comme la psychoacoustique, qui s'est largement développée avec la recherche de corrélats psychophysologiques dans la perception des sons simples et complexes, la prise en compte de l'influence des facteurs développementaux, ainsi qu'avec la modélisation du traitement auditif. C'est le cas aussi de la robotique, qui évolue rapidement, les approches classiques dominées par les problèmes d'optimisation de contraintes faisant place à des approches plus sensibles aux préoccupations des psychologues et des neurobiologistes, en tirant parti d'outils conceptuels communs. Il en est de même de la biomécanique qui bénéficie du développement de moyens d'analyse puissants des paramètres cinématiques et dynamiques du mouvement et trouve maintenant sa place dans les conceptions émergentes du contrôle de la production motrice. C'est le cas, enfin, du développement perceptivo-moteur qui devrait participer du renouveau d'intérêt pour la dimension diachronique du comportement.

2 - MÉMOIRE ET APPRENTISSAGE

On peut caractériser l'évolution récente dans le domaine de l'apprentissage et de la mémoire par trois aspects marquants et interdépendants.

Tout d'abord, le domaine a connu un renouveau conceptuel avec la notion de pluralité des processus et systèmes de mémoire qui conduit à une réévaluation des rôles spécifiques de différentes structures et circuits cérébraux, et tente d'harmoniser les théories issues des recherches chez l'homme, les primates non humains et les rongeurs. Dans ce domaine, les travaux de psychologie expérimentale restent déterminants pour la caractérisation des dissociations fonctionnelles entre systèmes et/ou opérations de mémoire explicite et mémoire implicite, et leur étude en fonction de variables individuelles ou expérimentales (âge, contexte d'encodage, niveau de traitement). Chez le sujet normal ou malade, les progrès rapides dans l'analyse des supports biologiques sont dus en partie au développement de techniques de plus en plus sophistiquées d'imagerie cérébrale (TEP, IRMf, MEG) qui fournissent de riches informations sur les structures cérébrales activées lors de l'exécution de tâches comportementales ou cognitives (attention visuelle, imagerie mentale, langage, motricité fine). En parallèle, l'accroissement des connaissances sur les supports neurobiologiques de mémoires explicites et implicites est remarquable. Parmi les progrès récents, on peut citer en particulier une redéfinition du rôle des aires hippocampiques dans les mémoires relationnelles ou de l'amygdale dans la mémoire émotionnelle, le développement des études du rôle des ganglions de la base dans la mémoire procédurale, et l'analyse du codage et du décodage des informations sensorielles et motrices dans les structures corticales. Cet intérêt se manifeste notamment dans la conception de nouveaux tests d'exploration fonctionnelle chez l'homme et chez l'animal permettant, par exemple, l'étude des mécanismes de représentation spatiale, d'attention sélective, de gestion des informations contextuelles, d'automatisation, d'amorçage.

D'une manière générale, l'accent est mis de plus en plus sur une approche analytique et intégrative qui met en valeur les interrelations entre systèmes de mémoire. La question de l'indépendance relative de ces systèmes ou des processus qui régissent les aspects implicites et explicites, par exemple, est au cœur des débats actuels. Les recherches futures devraient aborder les facteurs qui assurent la cohésion de l'expérience cognitive, chez le sujet normal et pathologique, au cours du développement et du vieillissement ainsi que les aspects phylogénétiques de l'apparition hiérarchisée de ces systèmes. À cet égard, le domaine de la cognition spatiale est illustratif des convergences qui s'établissent au sein des sciences cognitives entre les disciplines traditionnelles de la psychologie, de la linguistique, de l'intelligence artificielle et des neurosciences.

Ensuite, sur le plan neurobiologique, une orientation prometteuse s'appuie sur les progrès récents accomplis dans les techniques d'enregistrement de l'activité unitaire de larges populations de neurones chez l'animal éveillé exécutant une tâche comportementale. Les recherches 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, étudiée par l'analyse de coupages temporels d'activité neuronale, de synchronisations et de propagation d'activité sur des réseaux distribués. Le succès de cette approche repose sur des enregistrements en sites multiples et une analyse du signal performante.

Enfin, un domaine très actif concerne les mécanismes cellulaires et moléculaires de la mémoire. Des percées spectaculaires ont été accomplies dans l'analyse des mécanismes de communication intra- et intercellulaire et de plasticité neuronale (potentialisation et dépression synaptiques, réorganisation des cartes sensorielles et motrices, phénomènes de croissance neuronale) impliqués dans la formation et la conservation de représentations mnésiques. L'analyse des mécanismes moléculaires de la mémoire se poursuit par l'identification de plus en plus précise des signaux de communication cellulaire et de leurs récepteurs, jusqu'aux mécanismes de régulation génique impli-

qués, mais aussi par l'étude des interactions entre neuromédiateurs, du rôle des neuromodulateurs, facteurs neurotrophiques et neurostéroïdes. Les progrès de cet axe et de celui de la génétique du comportement sont remarquables et restent étroitement liés aux avancées méthodologiques en biologie cellulaire et moléculaire, en particulier par la création de nouveaux modèles animaux mutants ou transgéniques.

Sur la base de cet ensemble de recherches, on peut dégager plusieurs tendances en émergence.

Tout d'abord, on place beaucoup d'espoirs dans le développement d'une nouvelle imagerie cérébrale animale, en parallèle avec l'imagerie fonctionnelle chez l'homme, qui apporte un grand pouvoir de résolution spatiale (activité métabolique, cartographie de récepteurs aux neuromédiateurs, motifs d'activation génique) et temporelle (imagerie calcium, phosphorylation de protéines, synchronisations neuronales et rythmes). Il devient alors possible d'identifier les structures et circuits cérébraux impliqués dans différents processus cognitifs (attention, acquisition, réactivation mnésique) en même temps qu'on peut identifier les mécanismes cellulaires et moléculaires sous-jacents. Cette approche est très prometteuse si elle s'appuie sur des modèles comportementaux bien définis et contrôlés. Elle constitue une bonne interface entre les études neuropsychologiques et les études cellulaires et moléculaires et constituera certainement une approche puissante des mécanismes de plasticité synaptique impliqués dans les fonctions cognitives.

On note aussi un élargissement des perspectives en psychologie cognitive et en neurobiologie de la mémoire aux cadres des processus développementaux, du vieillissement et des pathologies du système nerveux central. Pour les aspects développementaux, la compréhension des fonctions cognitives implique que l'on connaisse les processus qui construisent les systèmes par lesquels ces fonctions s'expriment. Cet intérêt se manifeste, par exemple, dans l'étude du rôle de la mémoire des exemplaires dans l'émergence de règles générales de traitement, des sources de l'amnésie infantile et, sur le plan neurobiologique, des mécanismes de maturation et de spécialisation corticale au cours du développe-

ment. On assiste aussi à une évolution sensible des perspectives dans le domaine du vieillissement ou de certaines pathologies neurodégénératives (maladies de Parkinson, d'Alzheimer). Il en est de même des études de l'altération et de la restauration des fonctions comportementales et cognitives après atteinte du système nerveux en corrélation avec les mécanismes de régénération et de réparation du système nerveux central. Ces recherches ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine biomédical (médicament, thérapie génique, marqueurs d'intérêt diagnostic).

Enfin, la recherche d'une modélisation biologiquement pertinente reste essentielle à l'analyse dynamique de certaines architectures de réseaux neuronaux complexes en relation avec les activités de catégorisation, d'apprentissage et d'engrammation, ou les dimensions cognitives de la motricité. Ces modèles dynamiques, comme, par exemple, l'implémentation de mécanismes d'apprentissage au sein d'architectures de contrôle (apprentissage associatif et apprentissage par renforcement, par exemple) ont évidemment des implications importantes tant du point de vue de la robotique que de l'intelligence artificielle et de la communication homme-machine.

3 - LE DÉVELOPPEMENT COGNITIF ET NEUROCOGNITIF

L'étude du développement cognitif se concentre sur l'architecture initiale du système d'acquisition, l'analyse des mécanismes de traitement et la nature des changements qui affectent les représentations dans les grands secteurs que sont perception, sensori-motricité, activités complexes, construction des connaissances, et langage. Les changements les plus notables dans le domaine du développement cognitif sont les suivants.

- Le déplacement des controverses récurrentes sur l'inné et l'acquis au profit du débat théorique et empirique sur la spécificité ou non des

mécanismes de traitement, eu égard à leur domaine d'application. En d'autres termes, il s'agit de savoir si les contraintes qui permettent de modéliser les phénomènes de développement sont spécifiques ou non de grands domaines de la cognition, tels que la connaissance spatiale, les divers aspects du langage, les théories spontanées sur les phénomènes physiques et les personnes par exemple. De ce point de vue, les comparaisons interdomaines (perception du langage/visages, raisonnement/langage) constituent une voie d'approche pour aborder les questions de la spécificité.

- La multiplication de réflexions théoriques et de données empiriques permettant de faire progresser la question centrale de la continuité ou discontinuité entre les capacités précoces du nouveau-né, du bébé et les développements ultérieurs dans le domaine de la cognition. On remarquera que les contours de cette question se trouvent repoussés par les connaissances nouvelles concernant les perceptions fœtales. On notera aussi que la notion de processus cognitifs précoces est elle-même controversée. Ces deux premières évolutions, conjuguées aux progrès concernant les banques internationales de données informatisées, sont très probablement à l'origine d'un regain d'intérêt, aux États-Unis mais aussi en Europe, pour les études longitudinales qui sont mieux que d'autres adaptées à l'étude du changement.

- L'intérêt croissant pour l'étude des mécanismes de transition plutôt que pour la caractérisation d'états. La question des mécanismes de transition par lesquels s'effectue le changement a connu récemment une évolution importante sous l'influence des modèles connexionnistes. Par le biais des principes de compétition et de sélection, ces modèles non linéaires et auto-organisés peuvent rendre compte de la transition entre deux états du système. Comme on le sait, ils ont été utilisés avec succès pour simuler le développement cognitif dans divers domaines, notamment le développement langagier.

- La prise en compte de la variabilité intra- et interindividuelle comme composante intrinsèque du développement. La nécessité d'aborder l'étude des variations, tant au niveau de la genèse que de la micro-genèse des comportements, s'est imposée

ces dernières années comme une approche heuristique dans les divers domaines du développement cognitif : l'accent mis sur la plasticité comportementale, sur les styles d'apprentissage ou les trajectoires développementales, relève de ce mouvement.

- L'intérêt croissant pour la mise en relation des processus cognitifs et de leurs substrats neuroaux au cours du développement. L'un des challenges les plus passionnants pour la psychologie cognitive du développement est la recherche d'articulations précises entre les données nouvelles fournies par les avancées techniques (imagerie cérébrale, enregistrement des potentiels évoqués, IRM fonctionnelle), notamment au plan de la maturation corticale, et les données comportementales.

La question centrale est de savoir comment se constituent les spécialisations corticales pour les compétences cognitives. Outre les structures impliquées dans les compétences telles que langage, mémorisation, attention, il conviendrait de développer les études concernant le cortex frontal, les connexions à longue distance dont le développement s'étend sur de très longues périodes (par exemple, le corps calleux). S'il convient de maintenir les recherches sur le nourrisson, il faut redonner un essor aux recherches sur le développement cognitif entre l'âge de un et cinq ans, sans perdre de vue que les continuités et discontinuités à l'œuvre au niveau neuronal n'ont pas nécessairement de correspondant au niveau comportemental. Du point de vue de la neuropsychologie du développement, la période de l'adolescence est une période au cours de laquelle existent des changements cérébraux et cognitifs importants. En particulier, c'est une période sensible pour l'étude des collaborations inter-hémisphériques.

Les recherches concernant les pathologies développementales devraient être principalement menées dans deux directions :

- sur les phénotypes spécifiques déviants ou les maladies du développement acquises in utero (Williams, trisomie 21, autisme, dysphasie et dyslexie développementale, maladies métaboliques,...). Ces populations offrent l'occasion d'étudier les troubles de la spécialisation corticale, et de déterminer dans quelle mesure existent des déve-

loppements de compétences “intactes”, mais se déroulant sur la base de mécanismes différents du normal et sur la base de localisations corticales, elles-mêmes différentes.

- sur les enfants atteints de lésions cérébrales à des moments divers de leur développement. L'étude de la plasticité fonctionnelle post-lésionnelle offre la possibilité de déterminer les raisons pour lesquelles différentes compétences ou différentes parties (ou réseaux) du cortex n'ont pas du tout la même plasticité. Par exemple, la plasticité post-lésionnelle pour le traitement des visages et la cognition spatiale est plus limitée que celle qui concerne le langage.

Enfin, du point de vue du neuropsychologue du développement cognitif, l'expérimentation animale s'avère particulièrement pertinente. Il devient en effet urgent de comparer systématiquement le développement du cerveau, les spécialisations corticales fonctionnelles entre espèces, et d'identifier les variations inter-espèces des hétérochronies de maturation dans tous les événements de maturation cérébrale tels que neurotransmetteurs, neuromodulateurs, architecture neuronale.

4 - PSYCHOLOGIE CLINIQUE ET PSYCHOPATHOLOGIE

Dans ce domaine, on notera tout d'abord que, de façon transversale, les variantes pathologiques offrent aux chercheurs psychologues des caricatures du normal qui peuvent souvent contribuer à l'émergence de nouveaux modèles. Les évolutions concernant l'approche clinique et la psychopathologie sont marquées par plusieurs tendances :

- Les importants progrès des Sciences Cognitives offrent de nouveaux paradigmes expérimentaux en même temps que des méthodologies de pointe telles que celles de l'imagerie cérébrale (déjà évoquées plus haut) : il est maintenant possible d'étudier le fonctionnement cérébral, avec un pouvoir de définition spatiale et temporelle très

précis, lors de la réalisation de tâches complexes avant et après administration de médicaments psychotropes. Ainsi, les troubles mnésiques provoqués par les médicaments psychotropes et ceux associés aux pathologies psychiatriques (schizophrénie, dépression) sont particulièrement étudiés. Un aspect important est l'étude de la répercussion de ces dysfonctionnements au plus haut niveau des fonctions cognitives, notamment dans les liens qui unissent mémoire et conscience ainsi que dans les différents domaines de recherche en psychopathologie. Dans ce cas, les recherches actuelles mettent l'accent sur l'évaluation et la mesure d'unités descriptives précises (unités de comportement, de mouvement, de conduite, de pensée, d'affect, etc.) afin de dégager des règles opérationnelles de reconstruction en procédant à une intégration à la fois transversale (par exemple, pharmacologie, biologie moléculaire et génétique d'un récepteur) et verticale (mode de transmission d'une anomalie membranaire, corrélats familiaux).

- La recombinaison des disciplines, où l'on passe de la psychiatrie biologique et de la neurobiologie à de nouvelles démarches comme celles des Neurosciences Cognitives ou de la Génétique du Développement. Pour ce dernier point, on peut noter un intérêt croissant de la communauté internationale pour l'étude des traits en tant que facteurs de vulnérabilité.

- Il existe enfin un intérêt croissant pour les approches concernant l'émotion, ses composantes, et ses dysfonctionnements pathologiques. Il est vraisemblable que l'on assiste là à un nouveau point de convergence entre la communauté médicale et celle des chercheurs.

La psychopharmacologie est tombée dans le domaine public et devient source de dérives médiatiques au moins autant que sociales. Il n'en reste pas moins que les très importants progrès accomplis récemment dans le domaine de la neuropharmacologie du comportement offrent des perspectives nouvelles pour la compréhension, mais aussi pour le traitement des troubles du comportement, en particulier dans le domaine des dépressions.

5 - LANGUAGE

Les orientations théoriques en psycholinguistique se regroupent selon qu'elles présupposent des mécanismes et des procédures neutres quant à leur domaine d'application, conception principalement représentée par les modèles connexionnistes de l'acquisition et du traitement du langage, ou qu'elles soutiennent au contraire la spécificité des domaines et voient dans le langage un module particulier dans lequel les représentations élaborées auraient un format spécifique, courant principalement représenté par la grammaire universelle et plus spécifiquement dans l'acquisition par la théorie des paramètres.

Les domaines classiques de la perception de la parole et de la reconnaissance des mots (écrits ou parlés) ont été les premiers à subir le double impact des modélisations connexionnistes, d'une part, et de l'approche comparative, d'autre part. Une restructuration théorique importante a pris place dans ces deux domaines. La mise en évidence d'une relation étroite entre notre perception du langage et les propriétés structurelles et statistiques des langues ouvre de nouvelles voies d'approche. En particulier, elle a conduit à une intégration des apports de la phonologie prosodique et autosegmentale dans les travaux de psycholinguistique centrés sur la perception de la parole continue.

On constate également un développement très important des études consacrées à la production du langage sous l'impulsion de cadres théoriques fortement élaborés. L'utilisation récente des techniques de masquage visuel ou auditif permet à son tour d'aborder les aspects les plus automatiques et évanescents de ces activités.

Les recherches sur l'analyse des phrases et la compréhension du langage ont beaucoup bénéficié des apports des techniques issues des mouvements oculaires et de la psychophysologie (potentiels évoqués et imagerie cérébrale).

L'étude de la relation entre les activités du langage et les activités cérébrales constitue sans doute un secteur clé de la psycholinguistique actuelle et

future pour lequel les données de la neuropsycholinguistique sont une source d'informations cruciales. C'est ainsi que dans le domaine de la pathologie, le développement et/ou le renforcement de plusieurs pistes de recherche est à prévoir :

- Étude translinguistique de l'aphasie, visant à distinguer les aspects "universels" de certains types de troubles du langage des aspects liés à la spécificité structurale de telle ou telle langue. Une extension des travaux déjà réalisés dans un tel domaine pourrait être l'étude de l'aphasie chez les polyglottes.

- Étude de la variabilité (interindividuelle, inter-tâche, intra-tâche) des comportements verbaux pathologiques. **La variabilité des troubles de l'aphasie dépend certainement des capacités stratégiques palliatives mobilisées par tel ou tel patient, dans telle ou telle situation, stratégies dont l'identification est importante pour la caractérisation des processus de récupération.**

- Étude de la récupération (partielle) des capacités linguistiques chez l'aphasique. **Une telle étude gagnera à se doubler d'une étude corrélatrice de la réorganisation fonctionnelle du cerveau, telle qu'elle peut être appréhendée grâce aux outils d'imagerie. Elle permettra également d'évaluer l'efficacité des différents programmes thérapeutiques (orthophoniques).**

- Étude des capacités linguistiques de l'hémisphère droit. **L'hémisphère droit a été le plus souvent considéré comme un tout au plan anatomophysiologique dont la contribution à la fonction linguistique serait limitée aux aspects pragmatiques de la communication verbale. Il conviendrait de déterminer, tant du point de vue cérébral que du point de vue linguistique, s'il est possible de "fractionner" le fonctionnement de cet hémisphère, comme on l'a fait pour l'hémisphère gauche, identifiant ainsi divers sous-systèmes ayant des fonctions plus spécifiques que celles qui ont été invoquées jusqu'à présent.**

- Étude des capacités lexico-sémantiques, du mot isolé au discours, de diverses populations psychiatriques. **Des outils rigoureux ont été, dans un premier temps, utilisés avec des sujets cérébrólésés**

(aphasiques et déments). Leur utilisation devrait à présent pouvoir être étendue à d'autres types de sujets.

- Étude neuropsycholinguistique des dysphasies développementales. Elle doit être entreprise et développée le plus rapidement possible, tant pour son intérêt fondamental en recherche que pour des raisons humaines et sociales évidentes.

Les études consacrées à l'acquisition du langage distinguent d'une part le développement précoce du langage (0 à 2 ans) et d'autre part son développement ultérieur jusqu'à la maîtrise de l'adulte. Les travaux consacrés à la perception et production précoces de la parole ont mis en évidence, dès les premiers mois de la vie, des capacités sophistiquées de traitement des sons de la langue – discrimination, catégorisation, représentation – structurées autour d'unités de l'ordre de la syllabe, et analysent plus récemment le rôle des déterminants prosodiques dans les procédures de segmentation de l'input. L'étude de la production précoce montre que, dès 9-10 mois, les distributions des sons produits sont spécifiques de la langue considérée. Les recherches récentes sur la structuration précoce du système linguistique visent à caractériser les processus qui président à l'installation des contraintes fondamentales de la langue, en analysant les interactions entre les composants prosodiques, morphosyntaxiques et lexicaux dans l'émergence des systèmes référentiels, temporels et spatiaux. L'analyse des relations entre communication prélinguistique et linguistique souligne que, dans le passage des routines d'interaction aux stratégies communicatives, un rôle important est dévolu à la capacité croissante de l'enfant à attribuer des états mentaux à autrui (Theory of Mind). L'acquisition du langage après deux ans, dans les divers domaines lexicaux, morphosyntaxiques, sémantiques et discursifs est caractérisée par des développements non linéaires marqués par d'importantes variations interindividuelles dont l'étude systématique commence. L'avènement du langage écrit, l'étude des processus de lecture ont permis d'évaluer les capacités de mise en relation des codes orthographique et phonologique en précisant les procédures d'accès et en cherchant à déterminer la part respective des processus automatiques et des processus contrôlés. À ces travaux

sur l'acquisition de la langue première viennent s'ajouter plus récemment des travaux sur l'acquisition des langues secondes ou du bilinguisme engagés dans une perspective résolument cognitive.

Voisinant avec les méthodes transversales classiques, les méthodes longitudinales, mieux que d'autres adaptées à l'étude du développement en terme d'étude des mécanismes de transition, connaissent un regain d'intérêt soutenu par la constitution de banques internationales de données.

Les problématiques émergentes à retenir sont les suivantes :

- Les comparaisons inter-langues. Qu'il s'agisse de l'acquisition précoce ou plus tardive de la langue première, des langues secondes, des questions liées au bilinguisme ou à diverses pathologies, le recours à des langues variées, pour tester des hypothèses qu'une seule langue ne permet pas d'envisager, est appelé à d'importants développements dans l'avenir.

- Les comparaisons fondées sur la pathologie. Le recours à diverses populations, tels les enfants ayant des troubles spécifiques du langage, permet d'appréhender certaines dissociations (compréhension et production) attestées chez les enfants normaux dans les débuts de l'acquisition. Les syndromes de Williams et de Down sont particulièrement intéressants en ce qu'ils présentent des profils contrastés de l'évolution des relations cognition/langage. De la même manière, le recours à des enfants ayant des atteintes neurologiques focales avant 6 mois permet d'aborder des questions relatives à la plasticité neuronale et fonctionnelle dans le développement du langage. Enfin, dans la même perspective comparative, l'étude des enfants ayant des handicaps sensoriels devrait permettre de comprendre la nature des relations intermodales dans le développement du langage.

- Les variations interindividuelles. L'existence de variations transversales stables a conduit à postuler l'existence de deux mécanismes d'apprentissage : un mécanisme analytique qui permet de décomposer l'input en unités pertinentes pour construire des représentations adéquates, et un

mécanisme holistique qui permet de traiter des segments larges avant que ceux-ci ne soient analysés. Ces deux mécanismes semblent conjointement requis pour l'apprentissage du langage, mais les enfants varient quant au privilège dont ils dotent l'un ou l'autre. Les causes de ces différences sont encore largement inconnues.

Parmi les problématiques qui semblent appelées à d'importants développements dans les années à venir, mentionnons :

- L'étude des bases neuronales du développement du langage. Le rapprochement des spécialistes du développement du langage et des neuroscientistes attentifs au développement du cerveau et aux dysfonctionnements langagiers est l'une des orientations les plus prometteuses.

- Modularité versus non-spécificité des domaines. Il s'agit de rechercher de nouvelles propositions théoriques permettant de rendre compte à la fois des acquisitions langagières très précoces (domain specific) et de la plasticité des systèmes.

- Modélisation et simulation connexionniste. Ces simulations déjà réalisées dans certains domaines, en particulier le développement de la morphologie, vont être étendues aux dimensions syntaxico-sémantiques du langage.

6 - RAISONNEMENT ET COGNITION SOCIALE

6. 1 LE RAISONNEMENT, RÉSOLUTION DE PROBLÈMES, REPRÉSENTATIONS, DIDACTIQUE

Le lien étroit qui unit la psychologie cognitive à l'Intelligence Artificielle depuis ces vingt-cinq dernières années s'est traduit par un regain d'intérêt et une quantité considérable de travaux sur le

raisonnement. Ils se distinguent toutefois selon que celui-ci est considéré comme un domaine de recherche en soi ou comme une composante d'une activité cognitive qui l'englobe.

Dans la première approche, le raisonnement est abordé comme une structure logique particulière, indépendante des contenus et du contexte. La forme la plus étudiée en laboratoire est le raisonnement déductif, activité inférentielle qui permet de dériver des conclusions valides à partir de prémisses générales. Les résultats expérimentaux remettent cependant fortement en cause cette conception logiciste du raisonnement humain. On a été ainsi conduit à s'intéresser aux inférences non valides (raisonnement inductif, raisonnement analogique). Qu'il soit inductif ou analogique, le raisonnement est désormais étudié à la lueur de théories qui introduisent les facteurs contextuels, les facteurs de type pragmatiques, la notion de plausibilité des inférences ou qui considèrent le raisonnement comme un processus sémantique de construction et manipulation de représentations mentales du contenu des prémisses ("modèles mentaux").

Cette tentative de se rapprocher du raisonnement naturel se retrouve dans la deuxième approche dans laquelle le raisonnement est considéré comme une conduite heuristique parmi d'autres lorsque le sujet est en situation de résolution de problèmes.

Qu'il s'agisse de l'activité de résolution de problèmes dans des situations impliquant des connaissances spécialisées (expertise), dans des situations non familières où le domaine n'est pas connu, dans des situations scolaires, en ergonomie cognitive, on remet fortement en cause l'aspect inférentiel de l'activité. Les travaux les plus récents qui mettent en évidence l'aspect fonctionnel et contextualisé des connaissances conduisent à privilégier non pas le raisonnement, mais l'activation des connaissances ou leur transfert analogique. La résolution de problèmes est donc vue comme un problème de gestion de l'activité et des connaissances, ce qui se traduit par un regain d'intérêt pour les travaux sur la mémoire et le développement des approches connexionnistes de la cognition.

Une telle perspective nécessite de reconsidérer la question de l'architecture du système cognitif humain. La réponse ne pourra venir que d'une nouvelle théorisation du développement cognitif. L'enjeu consistera notamment à rendre compte de la variabilité intra- et interindividuelle. Il s'agit de passer d'une psychologie des performances à une étude individualisée des styles cognitifs.

Les problèmes méthodologiques qu'il faudra résoudre sont considérables. Les approches classiques de type mesures d'effets de groupes devront être complétées par des méthodes encore peu utilisées (voire à inventer) : analyse des protocoles individuels, mise à l'épreuve des hypothèses au moyen de tutoriels intelligents d'apprentissage, dont l'efficacité est conditionnée par une représentation appropriée du fonctionnement cognitif.

6. 2 L'ERGONOMIE

En ceci, les préoccupations de la psychologie cognitive rejoignent les tendances actuelles de l'ergonomie et se traduisent notamment par l'émergence d'une ingénierie cognitive et un net infléchissement vers les aspects cognitifs des activités finalisées. Parmi les orientations nouvelles se dessinent les thèmes suivants :

- Compatibilité entre les systèmes de présentation de l'information et le modèle mental construit par l'opérateur. Les notions de perception directe introduite par Gibson, d'affordance empruntée à la physiologie par Norman, d'interface écologique, suggèrent que l'analogie entre le système physique et les caractéristiques de l'interface de ce système permette de faire émerger les informations pertinentes. La position défendue par Wickens met l'accent, quant à elle, sur la nécessité pour l'interface d'être organisée sous une forme compatible avec les processus cognitifs mis en jeu dans la tâche. Cette référence aux processus cognitifs pour la conception des interfaces produit des retombées fructueuses tant sur le plan théorique qu'appliqué.

- Traitement de la dimension temporelle dans des situations complexes. Les travaux sur le contrôle de processus (environnements dyna-

miques) ont mis en évidence l'importance des activités d'anticipation. Ces activités nécessitent une analyse des paramètres temporels de la situation. Les hypothèses sur la nature des traitements cognitifs impliqués restent encore floues, d'autant que les travaux classiques de la psychologie du temps sont souvent peu utilisables compte tenu de la différence entre les empires temporels considérés. La cognition en situation dynamique est peu étudiée en laboratoire au niveau symbolique. Les modèles dont nous disposons en psychologie ne sont valables qu'en situation statique. De ce point de vue, l'utilisation des micromondes informatiques qui permettent un contrôle quasi expérimental des variables liées au sujet (expertise) et à la situation (le processus dynamique régulé), l'étude du caractère implicite ou explicite des traitements, des référents temporels internes ou externes au sujet, constituent des développements prometteurs de ce thème de recherche.

- Communication et régulation interindividuelle au sein de collectifs de travail, thème lié à l'émergence de nouvelles formes d'organisation du travail qui font reposer davantage la fiabilité des systèmes sur le groupe que sur l'individu. Ces travaux se développent autour de notions comme celle d'élaboration d'images et de modèles mentaux communs à plusieurs individus, de déterminants chronobiologiques, cognitifs et sociaux de leur actualisation, de compatibilité entre les moyens de communication fournis par le système technique et les besoins ou représentations des opérateurs. Une des conséquences est le développement d'une "ergo-linguistique" qui s'intéresse aux productions verbales, orales ou écrites (consignes, notices, ...).

Un autre infléchissement récent est relatif à la prise en compte de la variabilité interindividuelle. L'évolution démographique des pays industrialisés (vieillessement de la population notamment), et l'obsolescence de plus en plus rapide des savoirs liée à l'évolution technologique conduisent à mettre l'accent sur l'étude de la variabilité intra-individuelle des capacités fonctionnelles comme source importante de variabilité interindividuelle (changements dus au vieillissement d'une part, et aux processus d'acquisition et de transformation de l'expertise, d'autre part). Les recherches suscitées par ce contexte ne sont pas propres à la psycho-

logie ergonomique, mais s'articulent étroitement avec des sous-disciplines en fort développement au niveau international, telles que la psychologie du vieillissement et la psychologie de l'apprentissage et de la formation.

Le développement de ces travaux a tout naturellement des impacts en didactique qui est de plus en plus abordée dans l'élaboration d'outils hypermedia. Dans l'univers des environnements d'apprentissage, les trois directions qui semblent se dessiner sont les architectures multi-agents (agents virtuels et réels), le réalisme physique qui permet, puisqu'on n'est plus uniquement dans le symbolique, de prendre en compte l'intentionnalité de l'utilisateur, et enfin les systèmes d'aide s'appuyant sur le rapport "espace-temps" qui ont pour objectif de fournir l'information contextualisée pertinente à l'endroit et au moment appropriés.

6. 3 LA COGNITION SOCIALE

Comprendre comment les individus perçoivent le monde et les relations qui sont censées le fonder suppose de considérer le rôle joué par le contexte social. À un premier niveau, il s'agit de repérer comment les cognitions de l'individu se construisent dans l'interaction avec l'environnement, puis, à un second niveau, comment éventuellement elles se partagent, se socialisent et agissent en retour sur les comportements et l'appareil cognitif.

On a beaucoup conçu et étudié les processus fondamentaux, tels que le jugement, la perception sociale, la catégorisation par exemple et donc leurs dérivés, stéréotypes, attributions, formation d'impression ou encore mémoire des personnes, comme des processus qui résulteraient du seul traitement intrapsychique de l'information à partir des caractéristiques de l'objet ou de l'existence d'une norme. Bien qu'il soit incontestable que les processus d'attention, la mémoire, les activités inférentielles, sont ici engagés, on a sous-estimé le gouvernement de ces processus par le contexte social dans lequel l'information est traitée. Aussi assistons-nous à l'émergence d'un individu acteur et stratège qui construit son environnement en fonction de ses

motifs et des types d'interactions qu'il veut entretenir. Dès lors, l'approche des processus de base étudiés par la psychologie, comme elle peut relever d'une recherche fondamentale de leurs déterminants neurobiologiques, réclame aussi une recherche, tout aussi fondamentale, de leurs déterminants sociaux. Les productions cognitives et les comportements sont également des expressions de stratégies adaptatives, et les mécanismes et processus qui les génèrent apparaissent socialement régulés ou régulables.

À un niveau d'explication psychosocial, plus que les propriétés intrinsèques, biologiques ou psychologiques des individus et les caractéristiques des objets qu'ils traitent, c'est le rapport qu'ils entretiennent avec ces objets qui déterminent l'élaboration et la réalisation des mécanismes et des processus par lesquels ils donnent cohérence à leur environnement.

7 - ÉTHOLOGIE

En éthologie, l'étude du comportement bénéficie de l'apport de recherches théoriques nouvelles conduites dans les domaines de l'évolution, des sciences cognitives, de l'auto-organisation, voire de la vie artificielle. Construire des modèles prédictifs d'événements comportementaux constitue un souci croissant pour les éthologistes. Il en résulte que des champs d'étude comme la "behavioural ecology", la sélection sexuelle et le comportement reproducteur et parental, la sélection de parentèle et le comportement social ont vu s'accroître considérablement le nombre des publications. À un niveau plus formel, une meilleure compréhension des systèmes dynamiques non linéaires conduit à faire des modèles de description des comportements. En particulier, l'étude des processus d'interaction permet des modèles de conduites sociales dont les ingénieurs tentent aujourd'hui de s'inspirer en robotique collective.

L'éthologie de terrain (souvent liée à des contrôles de paramètres physiologiques ou biochimiques) a trouvé l'occasion de nouveaux

paradigmes, et contribue à la compréhension et à la préservation de la biodiversité et, plus généralement, à la gestion de l'environnement. Les problématiques nouvelles ainsi développées, grâce à une intégration plus poussée de la génétique des populations, grâce aussi à des moyens techniques aux performances croissantes, ont donné lieu à l'étude *in natura* d'espèces très variées, de Mammifères, d'Oiseaux, voire de Poissons et d'Invertébrés. Enfin les problèmes, plus éco-éthologiques, des stratégies d'utilisation des ressources sont abordés à la fois au niveau formel et à celui de la récolte de données susceptibles d'éprouver les modèles correspondants (Insectes, Araignées, Poissons, Mammifères). L'étude des communications interindividuelles (chimiques, visuelles, acoustiques, ...) connaît un développement notable, grâce en particulier aux progrès techniques concernant l'analyse des signaux correspondants et la réalisation de signaux artificiels.

Le développement de nouveaux outils, en neurosciences et en génétique notamment, relance l'étude des bases biologiques des comportements adaptés. La neuro-éthologie, en relation avec l'étude des mécanismes endocriniens, a offert un nombre important de nouveaux modèles animaux qui accroissent considérablement le nombre des espèces qui entrent au laboratoire, et posent aussi des problèmes éthiques nouveaux (Animal Welfare). La neuro-éthologie a permis de spécifier des circuits et des centres nerveux, voire des activités unitaires, impliqués dans le domaine général perceptivo-moteur. Ces études ont le souci de replacer les processus analysés dans le cadre des problèmes écologiques rencontrés par les espèces correspondantes. Cela donne un sens aux différences entre sexes ou entre espèces et montre l'impact de la sélection naturelle. Comme tout organe, le cerveau, produit de l'évolution, est au service des régulations particulières que chaque espèce, sexe ou individu doit promouvoir pour assurer sa survie et sa reproduction.

L'introduction d'une dimension cognitive en éthologie rejoint une problématique de psychologie animale qui recherche de quelle manière les animaux se représentent leur environnement et leurs congénères. Au-delà du modèle computationnel, à visée surtout fonctionnelle, l'éthologie contemporaine tente d'analyser la nature des processus

cognitifs chez les animaux et vise à créer un champ nouveau, qui serait l'évolution de la cognition. L'étude des processus de type culturel chez les Grands Singes (usage d'outils, habitudes alimentaires, ...), en particulier dans le milieu naturel, introduit directement à une perspective de psychologie comparée.

Les possibilités de manipulation du génome ont connu des développements importants qui permettent aussi la création de nouveaux modèles animaux. Par transgénèse ou invalidation, on peut reconnaître les gènes qui modifient le comportement, cependant que les nouvelles techniques neuro-anatomiques permettent d'en saisir plus précisément les corrélats nerveux.

L'utilisation de démarches formelles prend une importance croissante en éthologie. La diversité des modèles peut donner lieu à une classification selon les outils formels employés ou selon les types de performances comportementales auxquelles ils s'appliquent. La dynamique des systèmes non linéaires, les processus algorithmiques, les modèles de la théorie des jeux permettent de formaliser l'émergence de comportements complexes, les stratégies d'utilisation de l'espace ou le réglage des conduites adaptatives. Un lien concret avec la robotique s'établit dans le cadre de la démarche "animat" qui met en œuvre des agents artificiels, réels ou simulés, et recherche les conditions qui leur permettent de mimer des performances observées chez les êtres vivants. Dans ce cadre, les principaux thèmes de recherche actuels portent sur la mise au point d'architectures de contrôle intégrant perception, motivation et émotion dans le cadre d'une "sélection de l'action". D'autres aspects, aujourd'hui en plein développement, concernent l'évolution des processus adaptatifs et l'émergence des phénomènes collectifs complexes à partir d'interactions entre agents simples.

La multiplication des modèles animaux et l'introduction de nouveaux paradigmes théoriques constituent les événements majeurs des dernières années. Tous deux concourent à considérer le comportement à la fois comme outil d'une adaptation active et résultat d'une histoire phylogénétique basée sur la sélection naturelle.