

Physiologie de la perception et de l'action

M. Alain BERTHOZ, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

Fondements cognitifs de l'interaction avec autrui

Le but du cours a été d'étudier non seulement les deux termes de la perception de soi et d'autrui comme nous l'avons fait l'an dernier, mais aussi la relation entre soi et autrui. Ce sujet est majeur car la physiologie du XX^e siècle a concentré ses efforts sur le sujet « solipsiste ». Aujourd'hui le cerveau, pour le physiologiste, n'est plus seul. Une physiologie de l'interaction est en train de naître et c'est ce chantier auquel nous espérons avoir contribué par ce cours, à la suite des cours précédents et des ouvrages publiés sur ce sujet¹. Les hypothèses centrales du cours sont les suivantes : la perception est action simulée² ; la perception est décision³ ; la relation avec autrui est plus qu'une simple combinaison de la perception de soi et d'autrui ; la relation est fondamentalement inscrite dans l'acte partagé, dans la co-action réelle ou simulée, elle est, selon la théorie des kinaesthéses de Husserl, co-constitution d'un monde (Umwelt) commun⁴. Les fondements de la relation avec autrui sont donc à rechercher dans la « perç-action » partagée. Nous avons d'abord examiné les bases neurales de la contagion motrice et émotionnelle. Celle-ci est particulièrement explicite dans la mimique faciale, elle est innée et peut être démontrée très tôt chez le bébé. Le traitement des informations visuelles implique plusieurs voies corticales et sous-corticales qui peuvent intervenir dans cette contagion à un niveau très précoce du développement. Le bâillement et le rire sont deux exemples dont nous avons évoqué les mécanismes. L'imitation est un comportement plus élaboré que la simple contagion motrice ou émotionnelle. Déjà chez le singe, on a montré que l'imitation suppose que l'animal ait pu accéder à « l'attention conjointe ». Nous avons résumé

1. A. Berthoz et G. Jorland, *L'empathie*, O. Jacob (2004).

2. Une thèse soutenue dans A. Berthoz, *Le sens du mouvement*, O. Jacob (1997).

3. Une thèse soutenue dans A. Berthoz, *La décision*, O. Jacob (2003).

4. A. Berthoz et J.L. Petit, *Physiologie de l'action et Phénoménologie*, O. Jacob (2006).

les différents modèles d'imitation proposés par les psychologues chez le singe. Par exemple, il semble que les grands singes souffrent d'une capacité limitée dans la « planification hiérarchisée ».

Chez l'enfant, le rôle du contexte et de la hiérarchisation des buts ont été largement étudiés et on a pu montrer que l'imitation s'accompagne très tôt d'une capacité de détecter l'intention d'autrui. Ici aussi des modèles ont été proposés pour décrire l'acquisition de la capacité d'imiter entre 32 mois et 14 mois avec, par exemple, une progression entre la simple compréhension de l'action d'autrui, la poursuite de buts, le choix de plans d'action qui impliquent respectivement une relation dyadique, triadique (comme la désignation qui apparaît vers 1 an) et enfin collaborative et collective (vers 14 mois). Chez l'adulte, les modèles d'imitation sont évidemment beaucoup plus complexes et impliquent plusieurs routes neurales parallèles. Un troisième volet de ce premier cours a concerné l'observation des actions d'autrui. Nous avons rappelé la découverte du réseau « miroir » chez le singe (Sillon temporal supérieur STS, cortex pariétal, cortex pré-moteur F5), puis les travaux d'imagerie cérébrale qui ont conduit à décrire chez l'homme un réseau fonctionnel similaire (STS, pariétal, cortex pré-moteur ventral et dorsal). Nous avons décrit la relation entre ces aires et les aires corticales impliquées dans la perception du mouvement biologique, les différentes aires concernées par l'observation passive d'une action et l'observation en vue d'exécuter la même action (imitation de l'action). Des données récentes ont affiné l'analyse de ces systèmes en montrant que différentes parties du cortex pré-moteur sont activées en fonction de l'effet utilisé pour l'action. Toutefois, la même distribution est trouvée si l'on présente des images de séquences d'action de différentes catégories cognitives. La familiarité avec un geste influence l'activation de ce système neuronal. En résumé, plusieurs aires sont communes à l'imitation et à l'observation de l'action d'autrui : le STS, le cortex pariétal inférieur, le lobe pariétal supérieur, le cortex pré-moteur ventral et dorsal et le gyrus frontal inférieur. La dernière partie de ce cours a été consacrée à l'idée que le système miroir pourrait être à l'origine du langage. Cette thèse a été proposée dans une perspective évolutionniste et rejoint des thèses déjà anciennes sur l'émergence du langage à partir de l'organisation des séquences de gestes. La séquence proposée serait : préhension, neurones miroirs, imitation, imitation complexe, proto-signes, protolangage, langage. L'aire de Broca chez l'homme, dont la localisation semble approximativement correspondre à la région du cortex pré-moteur ou activée lors de l'observation des actions d'autrui, serait critique pour l'imitation. En effet, deux aires sont cruciales pour l'imitation et l'exécution, à savoir la région la plus rostrale du cortex frontal inférieur et la région la plus rostrale du cortex pariétal supérieur. Toutefois, cette thèse est contredite actuellement par des travaux récents d'imagerie cérébrale. Le raffinement des techniques révèle une parcellisation d'aires et il est possible qu'en réalité l'aire 44 soit une aire de transition entre le geste (traité dans l'aire 6) et le langage (traité dans l'aire 45). L'aire 44 pourrait être impliquée dans des tâches utilisant des gestes retardés. Les effets

miroirs chez l'homme ne seraient donc pas à l'origine du langage et de la communication, ils partageraient simplement, avec le langage et la production de plans d'action structurés, une composante fonctionnelle commune (traitement d'une structure hiérarchique) prise en charge par l'aire de Broca. Le débat sur cette question reste donc très ouvert.

Le deuxième cours a été consacré à l'émotion dans la relation avec autrui. L'enjeu ici est de comprendre la coopération entre le cerveau cognitif et le cerveau affectif. Ceci a déjà fait l'objet d'un cours précédent. Les hypothèses générales que j'ai soutenues sont les suivantes : l'émotion n'est pas une réaction passive, elle est préparation à l'action et fait partie intégrante de mécanismes mis en place au cours de l'évolution pour préparer l'action future en fonction du passé. Le médiateur de l'émotion partagée est un répertoire de comportements innés ou appris ; de synergies motrices expressives qui « font sens », autrement dit, qui signifient en même temps qu'elles préparent à l'action. L'émotion est une magie qui transforme le monde pour le rendre « possible » (Sartre). Nous avons aussi repris l'analyse de Cassirer qui dénonçait une certaine théorie psychologique qui méconnaît les purs phénomènes d'expression quand elle les fait naître d'un acte secondaire d'interprétation, en les expliquant comme des purs produits de l'empathie. Le défaut capital de cette théorie consiste à renverser l'ordre des données phénoménales. Elle doit au préalable ôter la vie à la perception, la convertir en un complexe de simples contenus de l'impression sensible pour ensuite ramener ce « matériau » mort de la sensation grâce à la pénétration affective⁵. Dans un cours des années précédentes, nous avons vu que cette analyse par émotion et cognition est aussi celle que développe une approche néo-behaviouriste anglo-saxonne. Le problème est donc complexe et nous l'avons abordé en commençant par rappeler, sur les traces de Darwin, le répertoire des expressions corporelles des émotions. Les données des éthologistes révèlent que les comportements défensifs des humains sont très proches, dans des situations de peur ou d'anxiété, de ceux des mammifères et des primates non humains. On a pu identifier une aire du cortex pariétal (VIP) chez le singe, qui participe à la production de mimiques défensives stéréotypées. De même, la stimulation de l'aire poly-sensorielle du gyrus précentral chez le singe induit des postures défensives. Ce sont donc des postures complètes, des actes expressifs, qui sont contrôlés par ces aires et il est intéressant de constater qu'elles sont proches des aires du système miroir. Pour examiner le rôle de l'émotion chez l'homme dans la relation avec autrui, nous avons fait un rappel sur les bases neurales des processus émotionnels. L'expression d'une émotion par un visage influence l'activité dans le STS (une station du système miroir) dans l'amygdale et il semble qu'il y ait une plus grande activation de l'amygdale gauche pour la peur ; l'expression corporelle des émotions influence l'amygdale et le gyrus fusiforme. Un travail récent a même porté sur les bases neurales de l'amour maternel. Un circuit spécifique est mis en jeu

5. E. Cassirer, *Philosophie des formes symboliques*, 3 (Éd. de Minuit, 1957, p. 89).

lorsque des sujets très amoureux regardent leur partenaire (activations de l'insula médiane, du cortex congulaire antérieur, du noyau caudé et du putamen bilatéralement) ; désactivation de l'amygdale et du gyrus cingulaire postérieur, etc.). L'amour « romantique » a été comparé avec l'amour « maternel ». En mesurant l'activité cérébrale chez des mères qui observent leurs enfants ou des enfants d'autres parents, on trouve ici encore des groupes d'aires impliquées dans ce comportement particulier de l'amour maternel. Il est très intéressant de signaler que ces comportements affectifs de relation avec autrui produisent des activations mais aussi des désactivations (par exemple de la jonction temporo-pariétale et du cingulum postérieur). Il faut toutefois rappeler que la désactivation d'une aire ne veut pas nécessairement signifier une absence d'activité. En effet, cette aire peut contenir des neurones inhibiteurs et sa désactivation partielle peut libérer une activité dans une autre structure. Le lien entre l'imagerie cérébrale et la neuro-endocrinologie a été réalisé par exemple par l'observation du fait que certaines des régions activées par l'amour maternel et romantique contiennent un haut niveau d'ocytocine et de vasopressine qui sont des hormones impliquées dans l'attachement affectif. Nous avons terminé ce cours par quelques réflexions sur les bases neurales de l'empathie basées sur les hypothèses suivantes⁶. L'empathie n'est pas la « théorie de l'esprit ». Ce n'est pas non plus la sympathie. L'empathie consiste à se mettre à la place de l'autre sans forcément éprouver ses émotions, la sympathie consiste inversement à éprouver les émotions d'autrui sans se mettre nécessairement à sa place, c'est une contagion émotionnelle dont le fou rire est un exemple, elle correspond à un point de vue égocentré sur le monde et autrui et relève de l'imitation. J'ai proposé de « spatialiser l'empathie ». En effet, se mettre à la place de l'autre, c'est adopter le regard de l'autre, c'est changer de perspective. L'empathie est mon propre regard (dans le sens fort de regard) que je porte sur le monde. Or la physiologie du regard est une physiologie des manipulations de l'espace par l'action, l'intention, l'émotion, l'attention, etc. L'empathie suppose donc un point de vue allocentré et utilise les mêmes mécanismes que le changement de point de vue. C'est un processus dynamique qui exige que nous nous dédoublions, que nous créions un « corps virtuel »⁷. Nous avons examiné plusieurs études d'imagerie cérébrale qui suggèrent aussi que dans l'empathie il faut considérer les problèmes de la représentation partagée, de la conscience de soi, de la flexibilité mentale, etc. Il semble que trois aires soient particulièrement impliquées par l'adoption de la perspective d'autrui concernant a) des actions imaginées (cingulum postérieur et cortex frontopolaire) ; b) une connaissance (le paracingulum antérieur et le cortex frontopolaire), un sentiment (les trois aires citées). L'émotion partagée peut aussi avoir la simple lecture comme intermédiaire. Une étude a montré l'activation de la *pars orbitalis* lors d'une histoire triste ou joyeuse écoutée par contraste avec la *pars opercularis* impliquée dans l'expression motrice de l'émotion. Le problème des bases neurales de l'em-

6. A. Berthoz et G. Jorland, *L'empathie*, O. Jacob, 2004.

7. A. Berthoz, *La décision*, O. Jacob, 2003.

pathie est donc loin d'être résolu mais il s'agit bien d'un des grands enjeux des neurosciences cognitives dont l'impact en psychiatrie, pédagogie et pour de nombreux domaines comme la théorie de la décision, est majeur.

Le troisième cours a été consacré au rôle du geste dans la relation avec autrui. La thèse principale de ce cours fut que, comme dans la tradition médiévale⁸, le geste n'est pas seulement mouvement (« motus »), il est fondateur de la relation avec autrui. Mieux qu'un mot, il simule l'action (gestus), l'acte même. Il peut aussi être « geste arrêté » comme dans la tradition asiatique du « ma ». Il est signe, symbole (« signus »). Il est immédiatement compréhensible, il déclenche un effet « miroir ». Il faut le distinguer de la « gesticulati » et est une composante importante de l'« habitus ». Il est aussi un des piliers de l'éloquence. Pour Aristote et Cicéron, « l'actio » doit exprimer les mouvements de l'âme dans les trois registres : la physionomie (« vultus »), la voix (« sonus ») et le geste (« gestus ») auquel il faut ajouter la démarche (« incessus »). Les études chez le primate ont révélé⁹ que le geste peut menacer mais aussi réconcilier. Nous avons cité les travaux de De Ajuriaguerra sur les postures de tendresse. Enfin, le geste est outil de compréhension même pour les concepts les plus abstraits. « Le concept de geste nous semble crucial pour approcher le moment d'abstraction amplifiant des mathématiques¹⁰ ». Est-il possible de construire une physiologie du rôle du geste dans la relation avec autrui ? Les travaux des éthologues et psychologues en établissent les bases comportementales (nous avons déjà mentionné les travaux sur l'imitation chez le primate non humain). Chez l'homme, la neuropsychologie fournit des données essentielles. Par exemple, dans des tâches de reconnaissance de pantomimes, il semble que le cortex gauche code les gestes qui impliquent une connaissance de la structure du corps propre alors que le droit est impliqué quand il faut examiner les propriétés visuo-spatiales des gestes. Dans d'autres tâches d'imitation, par exemple un mouvement dirigé vers un but, l'analyse par IRMF des aires impliquées dans l'imitation d'un mouvement dirigé vers un but (en comparaison avec la simple imitation d'un mouvement sans but) montre une activation du gyrus frontal inférieur (BA44). De même, l'imitation d'un geste signifiant engage, en plus du circuit miroir classique, l'aire motrice. Une action signifiante pour un sujet évoquerait pour lui son répertoire personnel et peut donc être reproduite de façon interne. Un résultat étonnant suggère aussi que pour bien imiter les gestes d'autrui il faut se reposer ! Un travail en IRMF montre, en effet, que dans l'apprentissage d'un instrument de musique (la guitare en l'occurrence) une activation très particulière se produit pendant la période de repos qui suit l'apprentissage : les aires activées pendant la pause sont le gyrus frontal médian (aire 46) et des structures impliquées dans la préparation motrice. L'apprentissage des gestes d'autrui implique à la fois le système miroir et des

8. J.C. Schmitt, *La raison des gestes*, Gallimard.

9. F. De Waal, *La réconciliation chez les primates*, Flammarion.

10. G. Châtelet, *Les enjeux du mobile*.

structures de simulation mentale de l'action mémorisée. Un autre aspect de la relation avec autrui par le geste est le rôle que peut jouer la simple cinématique d'un geste sur la compréhension des aspects dynamiques des gestes d'autrui, par exemple si on regarde un sujet soulever un poids, le cerveau peut inférer le poids de l'objet seulement avec la cinématique du geste. Lever un poids peut ainsi influencer la perception que l'on a d'autrui soulevant un poids. Des modèles formels d'apprentissage ont été proposés. Au moins trois théories ont été suggérées pour expliquer comment un imitateur peut savoir si ce qu'il fait est conforme au modèle de geste qu'on lui présente : 1) les gestes perçus sont projetés (*mapped*) sur les sorties motrices *via* une représentation supra modale ; 2) les gestes sont représentés par le *feedback* sensoriel qu'ils produisent ; 3) les données visuelles sont liées aux représentations motrices par un apprentissage hebbien. Une autre théorie suppose que le geste imité est décomposé en un répertoire de « primitives », c'est-à-dire de mouvements élémentaires qui sont appris séparément puis intégrés. Nous avons décrit plusieurs travaux sur les ganglions de la base qui sont impliqués dans la sélection de l'action et l'organisation des séquences complexes de mouvements. Enfin, nous avons discuté brièvement le langage des signes. Ce langage met le geste au premier plan de la communication avec autrui. Nous avons rappelé la grande variété de signes qui dépendent de la configuration de la main, de l'emplacement de l'articulation, du mouvement, etc. Les gènes peuvent de plus être décrits avec une posture ou épelés avec la main. À cette variété de signes correspond une variété d'aires activées et une étude d'IRMf a montré par exemple que différentes aires du cortex sont activées suivant que le signeur désigne un visage fameux, un animal, ou un visage inversé. Mais plusieurs systèmes de langage de signes sont élaborés. Le système américain ASL utilise, pour décrire les relations spatiales entre les objets de « constructions classificatoires » qui permettent de représenter la configuration globale des relations entre les objets en utilisant des « morphèmes manuels » ou des positions relatives des mains dans l'espace des signes. Le cortex pariétal droit est activé par la description de ces constructions classificatoires sans doute en raison de la nécessité d'effectuer des transformations visuo-spatiales globales. Par exemple le gyrus supra marginal droit est activé bilatéralement par les gestes indiquant la configuration globale, lorsque l'usage des prépositions implique seulement le gyrus supra marginal droit. Un résultat surprenant : le fait de simuler en ASL le fonctionnement d'un outil par une « iconicité motrice » ne change pas les activités liées à l'évocation simple de l'outil ou de l'action qui utilise l'outil. On voit qu'ici aussi le rôle du geste dans l'interaction avec autrui est un immense champ encore à peine défriché.

Le quatrième cours a porté sur l'action et l'intention partagée. Nous y avons particulièrement examiné les bases neurales de l'attention conjointe dont nous avons déjà dit plus haut qu'elle est fondamentale pour l'imitation. En réalité l'attention conjointe est une des bases de la relation avec autrui. Elle met en jeu des processus complexes qui font intervenir aussi bien des échanges de regard,

de geste, la forme et le contexte de l'objet de l'attention, la mémoire et l'émotion. Plutôt qu'une simple imitation de l'action de l'autre, l'attention conjointe permet de faire une action orientée vers un but commun. Elle peut être consciente ou inconsciente. Les éthologistes ont cherché à proposer une taxonomie des différentes formes d'attention conjointe. Celle-ci apparaît chez l'enfant entre 9 mois et 10 mois en même temps que la désignation. Son apparition est parallèle à celle de la conscience de soi affective. Deux grandes théories ont été proposées concernant la relation entre développement de l'affect et de l'attention conjointe. La première, « cognitive », suppose que l'enfant interagit avec les autres et que se développent d'une part les représentations d'intention d'autrui (théorie de l'esprit), et de l'autre la conscience de soi, l'affect ne venant que tardivement se superposer à ce processus. L'autre théorie (de « l'engagement affectif ») suppose au contraire que l'enfant fait à la fois l'expérience de l'attention d'autrui dirigée vers lui et de la conscience de soi affective. L'affect est alors présent dès le début du processus. Un élément fondamental de l'attention conjointe est le regard échangé. Ici encore une typologie a été proposée. Par exemple, on a essayé de distinguer entre le regard partagé ou évité, le suivi conjoint par le regard (on suit le même objet qu'autrui), l'attention conjointe (on fixe le même objet qu'autrui), l'attention partagée, la théorie de l'esprit, etc. Des études ont montré la prédisposition chez l'enfant à partager le regard d'autrui et à mettre en relation l'intention d'autrui avec la direction de son regard. On a aussi montré que le regard d'autrui peut influencer la perception pendant une durée qui dépasse le simple temps du regard d'autrui. Enfin des mécanismes d'inhibition du regard partagé sont mis en jeu dans les relations sociales par exemple et liés aussi bien à des facteurs affectifs que défensifs ou normatifs. Puis nous avons abordé les bases neurales de l'attention dont nous avons examiné les divers mécanismes et en particulier la diversité des modes d'attention (soutenue, sélective, série ou parallèle, pré attentive, divisée, etc.) l'attention conjointe n'étant qu'un des aspects de l'attention. J'ai rappelé que nous avons consacré un cours entier il y a quelques années à l'attention ou plutôt aux mécanismes attentionnels et j'ai résumé les connaissances sur ce sujet. Enfin nous avons discuté de la pathologie de l'attention conjointe. Des données récentes éclairent un aspect nouveau de l'attention : l'existence de phénotypes attentionnels fortement déterminés de façon génétique ; des corrélats neuronaux de ces phénotypes ont été trouvés par imagerie cérébrale et nous incitent à abandonner l'idée d'un cerveau prototypique au bénéfice d'une nouvelle neuroscience cognitive de la variabilité inter-sujets. Des déficits majeurs de l'attention conjointe ont été observés dans des maladies psychiatriques comme l'autisme et la schizophrénie et un déficit du fonctionnement du cortex ventro-médial chez les enfants autistes, lié à un déficit de l'attention conjointe a été récemment découvert. De même, il existe une relation entre les aires activées par l'attention conjointe et les aires dont le volume est modifié chez les patients autistes. Enfin nous avons terminé ce cours par un examen des déficits de l'attention conjointe chez les patients schizophrènes.

Le dernier cours a été consacré au cerveau social. Une nouvelle discipline est en train de naître : les « neurosciences cognitives sociales ». Leur champ d'étude est vaste et se décline par des sujets aussi différents que la conscience de soi et d'autrui, l'agentivité (identification de qui est à l'origine de nos actions ou de nos perceptions), la stabilité émotionnelle et personnelle, les valeurs morales, les normes sociales, etc. Le répertoire des expressions corporelles qui, au-delà de la simple expression des émotions, sont inutilisées pour la communication sociale a été étudié. On sait aussi que les primates ont la capacité de comprendre des fausses croyances, de détecter le mensonge d'autrui. Un des aspects fondamentaux de l'interaction sociale est évidemment l'acquisition du comportement filial. Chez le singe, par exemple, il semble que trois régions du cerveau sont importantes dans cette relation : le cortex orbito-frontal, le cortex temporal antérieur, l'amygdale. On a aussi identifié, grâce à la neuropsychologie, des régions impliquées dans le déficit de relations sociales chez le bébé primate. Il faut citer parmi elles l'amygdale, le lobe temporal, le cortex dorsolatéral, etc. Nous avons rappelé le rôle physiologique de ces différentes structures et en particulier celle du cortex orbito-frontal et du cortex cingulaire antérieur ou du pôle temporal. Nous avons aussi plusieurs expériences récentes d'imagerie cérébrale qui montrent d'une part l'implication de l'amygdale et du gyrus fusiforme lorsqu'on présente à des sujets des scènes en les trompant, et, par contre, l'importance du STS et du cingulum antérieur lorsque les sujets observent autrui en train d'être trompé. Il est clair que ces aires (qui sont aussi, comme on l'a vu, impliquées dans le système miroir) sont importantes pour les interactions sociales. Il est toutefois possible que l'implication de l'amygdale soit indirectement liée au fait que, lorsqu'on est trompé, on perçoit un danger lié au mensonge. Des travaux récents sur la violation des normes sociales (et l'embarras qui en résulte parfois) mettent aussi en évidence le rôle des réseaux d'aires cérébrales très spécifiques. D'autres thèmes importants pour la relation avec autrui, par exemple le fait de raisonner à propos de la pensée d'autrui, font l'objet aujourd'hui de recherches. Nous avons terminé par l'évocation des travaux d'un de nos invités qui n'a pas pu venir en raison de l'annulation de son cours, le Pr. Knoblich, qui mène des travaux très intéressants sur la coopération entre acteurs. Les questions d'avenir sont par exemple : est-ce que nous nous co-représentons les actions potentielles et les tâches d'autrui même quand nous n'en avons pas besoin ? Sommes-nous influencés par les actions d'autrui seulement quand nous savons quelle est leur tâche ? Si une tâche est répartie entre deux personnes, comment chacun imagine-t-il le mode d'action de l'autre ? etc. On le voit, ce cours a bien été fidèle à la tradition du Collège de France de décrire la recherche en train de se faire. Un champ nouveau des neurosciences cognitives est né.

COURS À L'ÉTRANGER

— 23 novembre (Université La Sapienza, Rome) : Le regard : de la physiologie à l'interaction sociale.

— 24 novembre (Université La Sapienza, Rome) : Émotion et raison : les fondations cognitives de la décision.

SÉMINAIRES DU COURS DU PROFESSEUR ALAIN BERTHOZ

— 22 février : Pr. S. GALLAGHER (Cognitive Science Program, University of Central Florida, USA) « La perception d'autrui en action ».

— 1^{er} mars : Dr. T. SINGER (Institute of Cognitive Neuroscience, University College Londres), « Les bases neurales des émotions sociales et de l'empathie ».

— 8 mars : Dr. J. NADEL (CNRS/INSERM, Hôpital Salpêtrière, Paris), « La communication non verbale chez l'enfant et l'adulte autiste ».

— 22 mars : Pr. B. PICON-VALLIN (CNRS, Centre national des Arts dramatiques, Université Paris III), « La relation avec autrui dans le théâtre de Vsevolod Meyerhold et le théâtre russe ».

— 29 mars : Dr. A. C. BACHOUD-LEVY (INSERM, Service Neurologie, Hôpital H. Mondor, Paris), « Fonctionnement normal et pathologie de la relation entre soi et autrui ».

TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

1. PERCEPTION ET EXPLORATION ACTIVE DES OBJETS

1.1. PERCEPTION VISUELLE DES OBJETS

J. DROULEZ, M. WEXLER, C. MORVAN, M. VALLET, A. TUSCHER, C. DEVISME
(en coopération avec Renault)

L'équipe travaille dans le cadre d'un contrat Cifre avec Essilor sur la contribution des indices de gradients de disparité à la perception tridimensionnelle des surfaces. Dans une situation de perception active, lorsque le sujet est lui-même en mouvement, il dispose, en plus du flux visuel, de nombreuses informations sur son propre mouvement. Les informations de mouvement propre sont d'origines diverses (vestibulaires, proprioceptives, copies efférentes des commandes motrices) et peuvent contribuer à différents niveaux au traitement 3D des informations visuelles. Nous avons démontré et analysé quantitativement cette contribution dans la perception des distances absolues, de l'orientation des surfaces planes et du signe de la courbure 3D des objets. Nous avons en particulier montré que cette contribution n'est pas un simple indice additionnel (la parallaxe de mouvement) mais repose sur une contrainte interne conduisant l'observateur à préférer les interprétations tridimensionnelles stationnaires par rapport à un référentiel allocentrique. Dans certaines conditions, cette contrainte de stationnarité peut même l'emporter sur les contraintes de rigidité de l'objet et de régularité des textures. Lors de l'exécution de saccades oculaires, le cerveau anticipe les

conséquences de ces saccades sur l'orientation tridimensionnelle des objets. Nous étudions également l'influence du mouvement de l'observateur sur la constance de la forme et de la taille de l'objet. Enfin, nous avons étudié récemment l'influence de la compensation des mouvements oculaires dans la perception de la direction du mouvement d'une cible visuelle.

1.2. MODÉLISATION BAYÉSIENNE DES COMPORTEMENTS SENSORI-MOTEURS

J. DROULEZ, M. WEXLER, S. CAPERN, J. LAURENS

Nous avons développé (Programme Européen BIBA) un modèle bayésien dynamique de la perception du mouvement propre à partir des informations vestibulaires. Dans ce modèle, les caractéristiques dynamiques de la perception du mouvement et les ambiguïtés qui résultent de l'équivalence gravité-inertie sont expliquées par les connaissances *a priori* quantifiées de façon probabiliste. Nous avons également développé un modèle unifié de la perception des objets tridimensionnels à partir des informations visuelles (flux optique) et de la connaissance du mouvement propre (signaux vestibulaires et moteurs). Ce modèle permet d'intégrer de façon cohérente les hypothèses de rigidité et de stationnarité et reproduit un grand nombre de résultats psychophysiques. Enfin, l'implémentation sur un robot de programmes probabilistes nous a permis de démontrer l'efficacité de cette approche pour la fusion d'informations, la segmentation d'une scène en objets indépendants et la navigation. Cette approche est également appliquée à la calibration et à l'estimation de la pose de caméra ainsi qu'à l'extraction de données 3D à partir de séquences vidéo dans différentes conditions d'éclairage dans le cadre d'une collaboration avec EDF. Ces algorithmes sont utilisés dans l'interprétation et la numérisation de sites archéologiques.

2. DÉVELOPPEMENT PERCEPTIF ET INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE

C. MILLERET, N. ROCHEFORT, L. FOUBERT, E. BUI QUOC. En collaboration avec U.T. EYSEL (Université de Bochum, Allemagne), Z. KISVARDAY (University of Debrecen, Hongrie), P. BUZAS (National Vision Research Institute, Victoria, Australie), S. TANAKA (Riken BSI, Tokyo, Japon), J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

2.1. MISE AU POINT DES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES POUR L'UTILISATION DE COLORANTS SENSIBLES AU POTENTIEL DE MEMBRANE POUR L'IMAGERIE OPTIQUE

L. FOUBERT, C. MILLERET. En collaboration avec S. TANAKA (Riken BSI, Tokyo, Japon)

La technique d'imagerie optique permet de mettre en image l'architecture fonctionnelle du cortex. Le principe de fonctionnement en est le suivant : une caméra CCD est placée au-dessus de la préparation et enregistre les variations de réflexion d'une lumière incidente. Nous utilisons des colorants fluorescents sensibles au potentiel de membrane (V.S.Dye) apposés à même la surface corti-

cale, et y associons une caméra CCD à haute fréquence de rafraîchissement (< 500Hz). Une résolution temporelle de quelques millisecondes peut alors être atteinte. Notre collaboration avec l'équipe du Dr. S. Tanaka a précisément consisté à mettre au point et à valider expérimentalement cette dernière technique (pour le moins délicate). Après plusieurs séjours effectués au RIKEN en janvier dernier, nous avons pu enfin réaliser nos premières expériences d'imagerie optique à Paris, dans notre poste expérimental au Collège de France. Par là même, nous avons obtenu les premiers résultats concernant les aspects temporels de l'intégration inter hémisphérique visuelle au niveau du cortex visuel.

2.2. ORGANISATION SPATIALE DES DOMAINES D'ORIENTATION ET DE FRÉQUENCES SPATIALES ACTIVÉES PAR LES CONNEXIONS INTERHÉMISPHERIQUES VIA LE CORPS CALLEUX DANS LE CORTEX VISUEL DU CHAT : ÉTUDE PAR IMAGERIE OPTIQUE
N. ROCHEFORT, C. MILLERET. En collaboration avec U.T. EYSEL, Z. KISVARDAY, P. BUZAS

En enregistrant le signal « Bold » à l'aide d'un système d'imagerie optique ORA 2001, nous avons étudié ici la contribution des connexions inter-hémisphériques dans l'élaboration des cartes neuronales du cortex visuel chez le mammifère supérieur. Pour cela, en présentant des réseaux orientés mobiles, nous avons localisé et caractérisé fonctionnellement les régions activées par le corps calleux (CC) dans les aires visuelles corticales A17 et A18 de chats adultes dont le chiasma optique a été sectionné suivant le plan sagittal. Nous avons d'abord démontré que le CC pouvait activer des domaines d'orientation dans des régions plus étendues du cortex visuel que ce qui avait été décrit auparavant (par électrophysiologie), en incluant l'intégralité de la zone de transition (TZ) entre A17 et A18 mais également de larges portions de A17 et A18 elles-mêmes. Mais TZ était toujours activée alors que A17 et A18 ne l'étaient pas systématiquement ; l'activation de TZ était aussi toujours plus forte que dans les autres régions. Nous avons également observé que les domaines d'orientation activés par le CC dans TZ étaient distribués de façon classique, comme partout ailleurs dans le cortex visuel : de façon homogène, sans interruption, autour de singularités appelées « pinwheels ». Mais les domaines de fréquences spatiales ont quant à eux révélé une organisation jusqu'ici inconnue : ils étaient situés près de A18 pour les basses fréquences spatiales et situés près de A17 pour les hautes fréquences spatiales. Finalement, nous avons trouvé que les régions activées par le CC étaient également activées par la voie rétino-géniculo-corticale directe. Leurs cartes d'orientation respectives étaient très similaires. Toutefois, cette similitude s'est révélée décroître progressivement dans A17 et A18, en s'éloignant de TZ. Sur la base de ces données « spatiales », J. Droulez et D. Bennequin sont en train d'élaborer un modèle qui devrait permettre à terme de mieux comprendre comment le CC participe à la perception visuelle des orientations, des formes et des contours chez les mammifères supérieurs. Compte tenu des résultats, une distinction très claire devrait apparaître entre la portion médiane verticale centrale du champ visuel et ses régions périphériques.

3. RÔLE DU SYSTÈME VESTIBULAIRE ET SÉLECTION DES ENTRÉES SENSORIELLES DANS LA NAVIGATION ET LE CONTRÔLE DU MOUVEMENT : RECHERCHE SUR LE RAT

3.1. RÉPONSES DES NEURONES DU NOYAU ACCUMBENS CHEZ LES RATS EFFECTUANT LES TÂCHES NÉCESSITANT L'UTILISATION ALTERNÉE DE DEUX RÉFÉRENTIELS DIFFÉRENTS A.B. MULDER, R. SHIBATA, O. TRULLIER, S.I. WIENER

Ces expériences ont été conçues pour aider à déterminer comment les signaux neuraux concernant l'émotion (définie comme des états internes associés aux réponses des systèmes autonomes et viscéraux) sont intégrés aux représentations sensori-motrices de l'environnement, et pour comprendre leurs relations avec le comportement. De nombreuses études neuro-anatomiques, neurophysiologiques, et neuropharmacologiques, ainsi que des études portant sur l'effet de lésions, suggèrent que le noyau accumbens (NAcb) effectue l'intégration des informations provenant des systèmes limbique et moteur. Dans ce projet, nous avons enregistré les neurones du NAcb et de l'hippocampe chez des rats qui effectuaient en alternance deux tâches réclamant l'utilisation de repères respectivement locaux ou environnementaux. Nous nous attendions également à ce que les neurones de l'accumbens présentent des réponses liées aux récompenses (dues aux entrées dopaminergiques) et aux changements de stratégies requis par les deux tâches (dues aux entrées en provenance du cortex préfrontal). Les neurones du noyau accumbens ont été divisés en deux catégories — phasiques et toniques. En résumé, les neurones à décharge tonique du noyau accumbens intègrent les signaux liés aux récompenses et les signaux concernant la position du rat et jouent probablement un rôle dans la distinction entre différentes destinations. Cette étude a montré que la sélectivité spatiale des neurones de l'Acb se présente sous la forme d'une modulation des réponses comportementales. La sélectivité spatiale des neurones de l'Acb se distingue de celle de l'hippocampe par une résolution spatiale plus basse. Ces résultats viennent confirmer nos travaux qui ont montré l'implication du noyau accumbens dans l'apprentissage de préférences conditionnées de placement.

3.2. PLATE-FORME TECHNOLOGIQUE : SYSTÈMES MICRO-MINIATURISÉS POUR L'ENREGISTREMENT D'ENSEMBLES DE NEURONES CHEZ LE RONGEUR LIBRE DE SES MOUVEMENTS

Cette plate-forme de l'Institut de Biologie a été significativement renforcée grâce à plusieurs subventions y compris 3 contrats européens conclus fin 2005. Il y a désormais 2 postes d'expérimentations équipés pour l'enregistrement de 64 voies d'activité neurale aussi bien que les mouvements des rongeurs en comportement, et un troisième poste de 16 voies dédié aux enregistrements chez la souris génétiquement modifiée.

3.3. CONSÉQUENCE D'UNE INACTIVATION GÉNÉTIQUE SUR LES PROCESSUS NEURaux DE LA NAVIGATION

L. RONDI-REIG (CR CNRS), E. BURGUIÈRE (allocataire de recherche), G. PETIT (allocataire de recherche) (en co-direction avec le Pr. Mariani), C. FOUQUET (allocataire région Ile-de-France), K. IGLÒI (allocataire Ministère-ENS) (en co-direction avec le Pr. Berthoz), A. CRESSANT (France Alzheimer). Collaboration avec le Center for Learning and Memory (Pr. TONEGAWA), l'Université de Rotterdam (Pr. DE ZEEUW), l'Université Paris 6 (Pr. Mariani, Dr. TOBIN) et le laboratoire Sony (Dr. ARLEO)

Notre projet de recherche est centré sur l'analyse des bases neurales de l'orientation spatiale et de ses dysfonctionnements au cours du vieillissement. Ce projet s'appuie sur une double approche comportementale et génétique, avec d'une part le développement de tests de comportement permettant de disséquer finement différentes stratégies de navigation et d'autre part l'utilisation de souris transgéniques conditionnelles (i.e. dont le gène cible est inactivé ou surexprimé dans une région très précise du cerveau). Le premier volet de ce projet concerne le rôle joué par un mécanisme de plasticité synaptique, se produisant au niveau du cortex cérébelleux, dans les capacités d'orientation spatiale. Nous avons récemment corrélé l'absence d'un mécanisme de plasticité synaptique (LTD) au niveau des synapses entre les fibres parallèles et les cellules de Purkinje avec un déficit d'orientation spatiale. Nous avançons que ce mécanisme est nécessaire pour la mise en place d'une fonction d'adaptation sensori-motrice qui servirait aussi bien dans des fonctions motrices que dans des fonctions plus cognitives comme la navigation (Burguière *et al.*, 2005). Le deuxième volet du projet concerne les dysfonctionnements de l'orientation spatiale liés au vieillissement. Ce projet fait l'objet du projet de thèse de Géraldine Petit et de Céline Fouquet. Notre but est de comprendre l'origine des troubles cognitifs liés à l'âge en les dépistant le plus précocement possible. Notre hypothèse est que ces déficits ne seraient pas causés par la perte de fonction totale au niveau d'une structure mais plutôt par la réorganisation des réseaux neuronaux aboutissant à la modification de la fonction. Nous pensons que cette réorganisation se traduit par des changements de comportement, notamment des changements de stratégies de navigation. Nous avons récemment démontré que les stratégies de navigation les plus complexes, dépendantes de l'hippocampe (Rondi-Reig, Petit *et al.*, 2006) sont les premières altérées au cours du vieillissement. Plus récemment, notre projet chez l'animal a été étendu à l'homme grâce à une collaboration avec le Pr. A. Berthoz et M. Zaoui. Nous avons ainsi adapté, grâce à l'utilisation de la réalité virtuelle, un des protocoles expérimentaux de navigation que nous utilisons chez l'animal aux sujets humains. Le travail impliquant des sujets humains pose la question de l'organisation et du choix des stratégies de navigation en fonction de paramètres comme la complexité de l'environnement ou encore l'âge de l'individu. Un des buts de ce projet est notamment de comparer les propriétés de navigation entre homme et animal afin de mettre en évidence des propriétés de fonctionne-

ment communes aux différentes espèces. Il fait l'objet du projet de thèse de Kinga Igloi.

3.4. APPRENTISSAGES DIFFÉRENCIÉS POUR LA SÉLECTION DE L'ACTION DANS LES BOUCLES CORTICO-BASALES CHEZ LE RAT : ENREGISTREMENTS ÉLECTROPHYSIOLOGIQUES, MODÉLISATION COMPUTATIONNELLES ET SIMULATION ROBOTIQUE

M. KHAMASSI, en collaboration avec B. GIRARD, S. WIENER, M. ZUGARO (LPPA), A. GUILLOT, J-A MEYER (Animatlab, Université Paris LIP6), A. PEYRACHE, V. DOUCHAMPS, F. BATTAGLIA, A. ARLEO, A. MULDER, E. TABUCHI (Dept. of Analysis of Brain Function, Toyama, Japon)

Le projet concerne l'étude neurobiologique, la modélisation, et l'implémentation robotique de fonctions cognitives telles que l'apprentissage par renforcement, la sélection de l'action et la navigation. Plus particulièrement, il s'agit d'étudier l'organisation de ces fonctions dans une partie du cerveau du rat formant des boucles anatomiques entre le cortex préfrontal et les ganglions de la base, de comprendre comment ces boucles permettent l'apprentissage, la mise en œuvre et la coordination de différentes stratégies comportementales chez le rat, et comment la réplication de ces mécanismes chez un robot autonome peut lui permettre de survivre dans un environnement complexe et changeant. Le travail se focalise particulièrement sur les modèles Actor-Critic et leur extension possible à la combinaison de l'apprentissage de comportements dits « orientés vers des buts » avec l'apprentissage de comportements plus habituels. Il s'agit de relier cette distinction fonctionnelle des comportements du rat d'une part avec les territoires définis par les sous-parties motrices, associatives et limbiques des ganglions de la base, et d'autre part avec la distinction faite en robotique biomimétique des différentes stratégies de navigation (planning, locale, taxon) et de leur mécanismes d'apprentissage associés.

4. MÉMOIRE SPATIALE ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT

4.1. VERS UNE PHYSIOLOGIE DE L'ACTION PLURI-AGENTS J.L. PETIT (Université de Strasbourg)

Dans la perspective ouverte par deux ateliers interdisciplinaires organisés avec l'appui de Alain Berthoz et dédiés à l'interprétation des travaux de G. Rizzolatti et de son équipe sur les neurones miroir, nous avons examiné les présupposés de l'hypothèse selon laquelle l'empathie, la communication par le langage et plus généralement les œuvres de la culture pourraient avoir comme substrats certains systèmes résonnants du cerveau. En particulier nous avons repéré un préjugé en faveur d'une conception mimétique de l'interaction sociale, avec ce que cela implique de symétrie et d'homogénéité entre les rôles respectifs des participants. Comme critère d'acte social, nous sommes revenus vers la classique théorie des actes de langage en remontant à ses origines chez le phénoménologue A. Reinach, parce qu'il nous a semblé que les développements récents de cette théorie par

D. Vanderveken remettaient en vigueur son concept de l'acte pluri-agent. Ce rapprochement entre les tentatives des neurosciences pour rendre compte de l'interaction sociale et celles de la pragmatique du discours pour accueillir le pluralisme des agents nous a semblé ouvrir la voie à une entreprise encore inédite de naturalisation des bases du social, une entreprise qui corrigerait et enrichirait l'un par l'autre ces deux modes d'approche.

4.2. NAVIGATION HUMAINE DANS DES ENVIRONNEMENTS COMPLEXES : EFFET DE L'A *PRIORI* SUR LA MÉMORISATION

M. LAFON, A. BERTHOZ, H. HICHEUR

On distingue plusieurs stratégies cognitives dans la mémoire spatiale des trajets. Les unes privilégient la mémoire kinesthésique (égocentrique) des trajets parcourus (mouvements du corps associés à des indices visuels, acoustiques, etc.) et la mémoire épisodique, alors que les autres privilégient la mémoire de type cartographique (allocentrique). Ces différentes stratégies cognitives font intervenir des systèmes cérébraux à la fois communs et distincts. En particulier, il existe des modèles impliquant le circuit pariéto-frontal et le para hippocampe qui sont associés aux stratégies de type égocentré tandis que l'hippocampe est associé aux aspects allocentrés. La connaissance spatiale d'un environnement évolue au cours de l'apprentissage, permettant de passer de la stratégie de route (mécanismes égocentrés) à une stratégie de survol (représentation allocentrée). Malgré toutes ces connaissances, il reste de nombreuses études à mener, notamment dans le cas d'environnements très complexes, mêlant à la fois environnement de très grande taille, à plusieurs niveaux et parcouru à l'aide d'indices globaux de type carte. Nous nous concentrons plus particulièrement sur l'étude de la contribution kinesthésique à la mémoire des trajets.

4.3. RÔLE MULTIMODAL ET UNIMODAL DES INFORMATIONS AUDITIVES DANS LES MÉCANISMES D'ORIENTATION SPATIALE

A. LEHMANN, en collaboration avec P. FUCHS (Centre de Réalité virtuelle, CAOR, École des Mines de Paris), Pr. BÜLTHOFF et M. VIDAL (Cognitive Human Psychophysics Dept., Max Planck Institute, Tübingen)

Les différentes modalités sensorielles ont longtemps été considérées comme des modules indépendants communiquant avec un nombre restreint d'aires associatives multimodales. Cependant, de nombreux travaux montrent que notre perception du monde est intrinsèquement multi sensorielle. Comment sont combinées les informations provenant des différents sens en un percept du monde unifié et pertinent pour l'action ? Ce projet porte sur la contribution de la modalité acoustique aux mécanismes d'orientation spatiale. Une approche expérimentale basée sur l'emploi de la réalité virtuelle multi sensorielle (vision, audition, vestibule) est employée. La stimulation auditive est spatialisée grâce à une technique binaurale, permettant de simuler un environnement tridimensionnel externalisé interactif,

spécifiquement adapté à « l'écoute » de chaque individu (approche temps réel avec HRTF individuelles).

4.4. CONTRÔLE ET GUIDAGE DE LA LOCOMOTION HUMAINE

A. BERTHOZ, H. HICHEUR (LPPA), A. V. TEREKHOV (Dept. of Applied Mathematics and Mechanics, Moscow State University)

L'objectif de ce travail a été de fournir quelques éléments de compréhension sur les règles d'organisation de l'activité locomotrice chez l'homme. Deux niveaux de description de la locomotion sont pris en compte, l'analyse des processus aboutissant à la formation du pas et ceux liés à la génération de la trajectoire locomotrice. Les effets propres et conjoints du mode et de la vitesse de locomotion, ainsi que de la géométrie des trajets, sur la régulation de l'activité locomotrice, sont étudiés au moyen (principalement) de l'analyse cinématique mais également électromyographique et vidéooculographique. Les origines de certains invariants cinématiques de la locomotion humaine sont étudiées pour ces deux niveaux d'analyse et la caractérisation des mouvements du regard et du corps lors des changements de direction de marche est réalisée. Enfin, quelques approches et principes particulièrement intéressants, comme le principe de segmentation et celui d'optimalité, sont discutés dans le cadre général de l'étude expérimentale et de la modélisation des processus de génération et de contrôle des trajectoires locomotrices.

4.5. MODÈLES COMPUTATIONNELS CONTRACTANTS DES CIRCUITS SACCADIQUES : DU TRONC CÉRÉBRAL AU CORTEX

B. GIRARD, N. TABAREAU, A. BERTHOZ (LPPA), D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques Paris 7), en collaboration avec J.J. SLOTINE (NSL, MIT)

La génération de saccades oculaires implique l'activation de nombreux circuits neuronaux sous-corticaux (formation réticulée, colliculus supérieur, cervelet, ganglions de la base) et corticaux (champs oculaires frontaux, cortex intra-pariétal latéral, etc.), étudiés de manière approfondie depuis plus de trente ans. La richesse de données anatomiques, électrophysiologiques et comportementales accumulées permet d'envisager la modélisation de l'ensemble de ces circuits et de leurs interactions. La mise en œuvre d'un tel modèle a pour double objectif d'améliorer notre compréhension du fonctionnement du système saccadique dans son ensemble et de disposer d'un banc d'essai pour l'étude de la dynamique des multiples boucles interconnectées caractéristiques du système nerveux central. Ce dernier aspect, plus théorique, se fonde sur la théorie de la contraction pour les systèmes non linéaires (Lohmiller et Slotine, 1998). Dans ce cadre, une preuve mathématique reliant la transformation spatio-temporelle du colliculus supérieur au générateur de saccade et la géométrie des cartes colliculaires a été produite. Des modèles computationnels contractants (1) du colliculus supérieur et du générateur de saccades, (2) des boucles cortico-baso-thalamo-corticales ont également été proposés (Girard *et al.*, 2005).

4.6. IMPLEMENTATION ROBOTIQUE DU MODÈLE DES CIRCUITS SACCADIQUES DU TRONC CÉRÉBRAL

B. GIRARD, N. TABAREAU, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec
C. LASCHI, L. MANFREDI, S. MAINI (ARTS Lab, SSSA, Pise) et J.J. SLOTINE
(NSL MIT)

Les modèles contractants des circuits saccadiques développés au LPPA sont l'objet d'une implémentation robotique sur la plate-forme Paloma du laboratoire Arts de la Scuola Superiore Sant'Anna de Pise, dans le cadre du projet européen Neurobotics. L'objectif de ce travail est de tester des méthodes de contrôle alternatives aux approches ingénieur standard et de mettre en place un système d'expérimentation permettant de comparer les comportements humains de sélection de saccades mesurés expérimentalement avec celui des modèles en interaction avec le monde réel.

4.7. STRATÉGIES COGNITIVES DE ENCODAGE SPATIAL CHEZ LES HUMAINS : ÉTUDES PSYCHOPHYSIQUES EN RÉALITÉ VIRTUELLE

P. PANAGIOTAKI, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec J. DIARD (INRIA, Grenoble). Projet Magnapolis dans le cadre du projet européen BACS

Des études éthologiques et psychologiques expérimentales présentent des indices de deux stratégies principales d'encodage de l'information spatiale pendant la navigation en de nouveaux environnements chez les insectes et les rongeurs : a) l'encodage des amers visuels et b) l'encodage de l'intégration de trajet. Ces études suggèrent que la première stratégie est hiérarchiquement à un plus haut niveau cognitif que la stratégie de l'intégration de trajet. Pourtant, un encodage de l'intégration de trajet du type « sauvegarde » a lieu et peut s'utiliser en cas de disparition soudaine des amers visuels de l'environnement mémorisé. Chez les humains il y a encore peu de recherches étudiant la présence et le rôle de ces stratégies cognitives élémentaires de l'encodage spatial.

4.7.1. ÉTUDE DU RÔLE DES INFORMATIONS VISUELLES ET KINESTHÉSQUES À L'ORIENTATION SPATIALE ET À LA MÉMORISATION DES TRAJETS NAVIGUÉS P. PANAGIOTAKI, R.V. KENYON, A. BERTHOZ (LPPA)

Le thème particulier de cette recherche est de mettre en évidence chez l'homme au moyen des études comportementales a) les stratégies cognitives engagées pour le traitement et l'intégration des informations multi-sensorielles pendant la navigation spatiale et la mémorisation du trajet navigué, b) proposer des modèles cognitifs d'interprétation des systèmes cognitifs responsables pour le guidage et la mémoire topo-kinesthésique. Pendant cette étude, nous recherchons l'intégration multi sensorielle (informations visuelles et kinesthésiques) à la mémorisation des trajets navigués et à l'acquisition de la carte cognitive d'un espace navigué. Les participants naviguent dans des trajets prédéfinis (avec l'aide d'un casque de réalité virtuelle) dans la ville virtuelle Magnapolis2, et ils effectuent des tâches d'orientation vers le point initial et le point final de chaque trajet dans deux

conditions : condition de contrôle « gain normal » : la rotation réelle (mouvement du corps pendant la rotation active) sera la même que la rotation visuelle (la rotation dans l'environnement virtuel) ; condition « gain inversé » : le gain de la rotation réelle est le double du gain de la rotation visuelle. Or, chaque fois que le participant tournera à droite avec son corps, en effet, il tournera à gauche dans l'environnement virtuel.

4.7.2. REPRÉSENTATION ET PROCESSUS VISUO-SPATIAUX DANS LE MICRO ET LE MACRO-ESPACE CHEZ DES SUJETS SAINS ET CHEZ DES PATIENTS ÉPILEPTIQUES
P. PANAGIOTAKI, A. BERTHOZ (LPPA), L. PICCARDI, C. GUARIGLIA (Université La Sapienza, Rome). Projet Walking Corsi Test dans le cadre du projet européen WAYFINDING

Cette étude est menée chez des patients épileptiques pré- et post-opérateurs souffrant d'une épilepsie partielle pharmaco-résistante en cours d'évaluation pré-chirurgicale suivis dans l'unité d'épileptologie du service neurologique du Pr. Baulac de la Pitié Salpêtrière. Ces patients présentent un foyer épileptogène dont la localisation est assurée par l'investigation pré-chirurgicale afin de permettre une validation ultérieure de la technique d'imagerie cérébrale que nous souhaitons développer. Le but principal de ce projet de recherche est de réaliser une version du test de Corsi à large échelle. Cette version permettra d'évaluer la mémoire de la marche (ou plus précisément des déplacements corporels) à court terme (CT) et à long terme (LT). En réalisant le test de Corsi standard et le test de Corsi-Marche (Walking Corsi), il sera possible de vérifier si dans les espaces micro et macro les patients utilisent des stratégies différentes (égocentrique ou allocentrique). On peut émettre l'hypothèse que la performance des patients dépendra de l'échelle de l'espace utilisé.

4.8. STRATÉGIES COGNITIVES D'EXPLORATION PAR LE REGARD, TRAITEMENTS CONSCIENT ET NON-CONSCIENT

S. FREYERMUTH, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec P. KAHANE (Laboratoire de Neurophysiopathologie de l'épilepsie, CHU Grenoble) et J.P. LACHAUX (INSERM U280, Lyon)

Les études récentes en imagerie fonctionnelle et stimulations électriques intracérébrales ont permis de localiser 2 régions fondamentales dans la génération de saccades oculaires : les champs oculomoteurs frontaux et supplémentaires (FEF et SEF). Toutefois, la séquence temporelle d'activation de ces structures corticales n'a jamais été définie précisément chez l'homme. Notre étude repose sur des enregistrements EEG intracrâniens de patients épileptiques. Les composantes spectrales rapides (bande gamma, > 40 Hz) présentent des modulations au niveau des zones d'intérêt oculomotrices lors de la réalisation de protocoles cognitifs. Les structures activées lors des processus cognitifs de pré saccades, sont les FEF, le cortex préfrontal dorsolatéral et le gyrus cingulaire. Lors des saccades, les mêmes structures sont impliquées, ainsi que les SEF et l'opercule rolandique.

Lors des processus cognitifs, seules les saccades préparées étaient associées à une augmentation statistiquement significative des oscillations hautes fréquences. Nous avons retrouvé une activité spécifique à la décision : le cortex préfrontal dorsolatéral. Nous avons par ailleurs mis en place un protocole expérimental de lecture (aspects de traitement syntaxique et sémantique). Les premières analyses montrent des synchronies dans la bande gamma entre des aires du pôle temporal et du cortex frontal.

4.9. ÉTUDE DE LA DIFFÉRENCE ENTRE SYMPATHIE ET EMPATHIE SUR UNE POPULATION DE SUJETS SAINS AU NIVEAU MOTEUR ET SPATIAL PAR L'UTILISATION DE L'ANALYSE DU MOUVEMENT

B. THIRIOUX, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec G. JORLAND (École des Hautes Études en Sciences Sociales/CNRS) et Pr. M. BRET et Pr. M.H. TRAMUS (Université Paris VIII)

L'empathie et la sympathie sont deux composantes majeures des relations interpersonnelles au sein des interactions sociales. De nombreuses définitions et interprétations ont été données pour expliquer leur différence mais leur pluralité entraîne une absence de clarté conceptuelle qui conduit à confondre deux phénomènes cognitifs distincts. Nous avons donc créé un protocole expérimental visant à tester et expliquer cette différence à partir de l'hypothèse que nous proposons selon laquelle la sympathie serait sous-tendue par des mécanismes cérébraux qui nous permettent d'interagir avec les autres mais sans changer de point de vue alors que l'empathie supposerait un changement de perspective. Cette absence de changement de point de vue et cette prise de perspective seraient prouvées par une modalité motrice et spatiale spécifique à l'œuvre dans la relation entre soi et autrui : la symétrie par réflexion, modalité de la sympathie et la symétrie par rotation, modalité de l'empathie. Dans la symétrie par réflexion, si un sujet A face à un sujet B se penche vers sa droite, le sujet B se penchera vers sa gauche et inversement. Dans la symétrie par rotation, au contraire, le sujet B se penchera vers sa droite si le sujet A se penche vers sa droite et inversement. La première ne repose sur aucun changement de point de vue et consiste à absorber en soi la position d'autrui alors que la seconde procède par rotation mentale pour épouser le point de vue d'autrui sans se confondre toutefois avec lui. Cette expérience a utilisé la technique de la réalité virtuelle afin de mettre en place une interaction entre le sujet et un personnage virtuel représentant une funambule dansant sur un fil. Cette étude reposait sur l'utilisation de l'analyse du mouvement. Les variables portaient sur le caractère conscient ou inconscient du rapport à autrui et sur le changement de point de vue : de face ou de côté. Les résultats obtenus montrent une distinction entre deux types de rotation : (1) on observe une symétrie par rotation inconsciente dans une condition sans tâche explicite ; (2) une symétrie par réflexion dans une tâche explicité d'imitation dans une orientation spatiale en face à face ; (3) une symétrie par rotation dans une tâche explicité d'imitation avec changement de point de vue (présentation de l'avatar de côté).

Les temps de réaction montrent qu'il est toujours plus rapide d'effectuer une symétrie par rotation qu'une symétrie par réflexion. En revanche, pour toutes les conditions et quelle que soit la modalité de symétrisation utilisée, la durée d'exécution du mouvement de balance est identique à celle de l'avatar. On observe aussi une identité d'amplitude des mouvements. Ces résultats nous permettent donc de poser que l'empathie dont la modalité est la symétrie par rotation est un processus plus cognitif que la sympathie, dont la modalité est la symétrie par réflexion. Toutefois empathie et sympathie seraient sous-tendues par des réseaux communs, les systèmes résonnants, comme en témoignent l'identité de durée et d'amplitude.

5. BASES NEURALES DE LA PERCEPTION DES INTENTIONS ET DES ÉMOTIONS D'AUTRUI

J. GREZES (LPPA), Collaborateurs : Dr. S. BERTHOZ (Service de Psychiatrie de l'adolescent et du jeune adulte, Institut Mutualiste Montsouris, Paris), Dr. B. WICKER (Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée-INCM, CNRS, Marseille), Professeur B. De GELDER (Donders Lab for cognitive and affective neuroscience, Tilburg University, The Netherlands), Pr. A. BERTHOZ, S. PICHON, O. MORIN (LPPA)

Notre travail de recherche porte sur la perception et la compréhension des comportements moteurs réalisés par autrui, qui jouent un rôle crucial dans la communication et l'interaction sociale. Le but de ce travail est de décrire les mécanismes cognitifs et d'identifier les corrélats neuro-anatomiques qui sont impliqués dans les capacités à comprendre la signification du comportement d'autrui, à détecter les intentions et les émotions qui sont à l'origine de ce comportement et qui leur sont associés. Ce travail repose sur l'hypothèse d'un couplage étroit entre le système de représentation des actions et les systèmes de représentation des intentions et des émotions.

5.1. LA PERCEPTION DES INTENTIONS

Le couplage entre les systèmes de représentations de l'action et ceux de l'intention est étudié dans le cadre d'un projet en collaboration avec le Dr. S. Berthoz et le Dr. B. Wicker portant sur la détection de fausse croyance et de mensonge chez autrui à partir de la perception d'une action très simple, celle de porter une boîte. L'idée est d'identifier les bases neurales sous-tendant ces capacités de lire les intentions d'autrui chez des sujets sains et des autistes de haut niveau qui présentent de sévères déficits sociocognitifs, et de comparer la connectivité fonctionnelle entre les régions cérébrales identifiées entre ces deux groupes de sujets. L'une des originalités de ce projet repose sur la prise en compte de différences interindividuelles dans les comportements sociocognitifs sous la forme d'analyses de corrélations entre structures, fonctions et comportements.

5.2. LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS CORPORELLES D'ÉMOTIONS

Le second projet en collaboration avec le Pr. B. De Gelder, le Pr. A. Berthoz et S. Pichon a pour but d'étudier les bases neurales associées à la perception d'expressions corporelles d'émotions et de tester le couplage entre émotion et action. Les résultats de notre première étude en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle suggère que la perception d'expressions corporelles de peur, par rapport à une expression neutre, engage une étape supplémentaire, celle de se préparer à agir en réaction à l'émotion perçue. Ce processus de préparation d'action est sous-tendu par des activations au sein de la jonction temporo-pariétale et du cortex pré-moteur. La deuxième étude suggère que les expressions corporelles de colère sont perçues comme un danger potentiel puisque associées à des activations de l'amygdale et de l'hypothalamus, régions sous corticales connues chez l'animal pour jouer un rôle crucial dans les mécanismes de défense et de réactions physiologiques liées à la peur.

PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES

(Seules les publications de A. Berthoz figurent dans la liste ci-dessous)

2005

BRET, M., TRAMUS, M.-H. & BERTHOZ, A. (2005) : Interacting with an intelligent dancing figure : Artistic experiments at the crossroads between Art and Cognitive Science. *Leonardo*, vol. 38 (1) : 46-53.

BURGUIERE, E., ARLEO, A., HOJJATI, M.R., ELGERSMA, Y., DE ZEEUM, C.I., BERTHOZ, A. & RONDIREIG, L. (2005) : Spatial navigation impairment in mice cerebellar LTD : a motor adaptation deficit. *Nature Neuroscience*, 8 (10) : 1292-1294.

DUCOURANT, T., VIEILLEDENT, S., KERLIRZIN, Y. & BERTHOZ, A. (2005) : Timing and distance characteristics of interpersonal coordination during locomotion. *Neuroscience Letters*, 389 (1) : 6-11.

GIRARD, B. & BERTHOZ, A. (2005) : From brainstem to cortex : computational models of the saccade generation circuitry. *Progress in Neurobiology*, 77 (4) : 215-251.

GIRARD, B., FILLIAT, D., MEYER, J., BERTHOZ, A. & GUILLOT, A. (2005) : Integration of navigation and action selection functionalities in a computational model of cortico-basal ganglia-thalamo-cortical loops. *Adaptive Behavior, Special Issue on Artificial Rodents*, 13 : 115-130.

HICHEUR, H., VIEILLEDENT, S. & BERTHOZ, A. (2005) : Head motion in humans alternating between straight and curved walking path : Combination of stabilizing and anticipatory orienting mechanisms. *Neuroscience Letters*, 383 (1-2) : 87-92.

KHAMASSI, M., LACHÈZE, L., GIRARD, B., BERTHOZ, A. & GUILLOT, A. (2005) : Actor-critic models of reinforcement learning in the basal ganglia : From natural

to artificial rats. *Adaptive Behavior, Special Issue Towards Artificial Rodents*, 13 : 131-148.

MEYER, J.-A., GUILLOT, A., GIRARD, B., KHAMASSI, M., PIRIM, P. & BERTHOZ, A. (2005) : The Psikharpax project : Towards building an artificial rat. *Robotics and Autonomous Systems*, 50 (4) : 211-223.

MILEA, D., LOBEL, E., LEHERICY, S., PIERROT-DESEILLIGNY, C. & BERTHOZ, A. (2005) : Cortical mechanisms of saccade generation from execution to decision. *An. NY. Acad. Sci.*, 1039 : 232-238.

2006

DUMONTHEIL, I., PANAGIOTAKI, P. & BERTHOZ, A. (2006) : Dual adaptation to sensory conflicts during whole-body rotations. *Brain Res.*, 1072 (1) : 119-132.

HICHEUR, H., TEREKHOV, A.V. & BERTHOZ, A. (2006) : Intersegmental coordination during human locomotion : does planar covariation of elevation angles reflect central constraints ? *J. Neurophysiol*, 96 (3) : 1406-1419.

ISRAEL, I., SIEGLER, I., RIVAUD-PECHOUX, S., GAYMARD, B., LÉBOUCHER, P., EHRETTE, M., BERTHOZ, A., PIERROT-DESEILLIGNY, C., FLASH, T. (2006) : Reproduction of self-rotation duration. *Neuroscience Letters*, 402 (3) : 244-248.

LACHAUX, J.P., HOFFMANN, D., MINOTTI, L., BERTHOZ, A. & KAHANE, P. (2006) : Intracerebral dynamics of saccade generation in the human frontal eye field and supplementary eye field. *Neuroimage*, 30 (4) : 1302-1312.

RONDI-REIG, L., PETIT, G., TOBIN, C., Tonegawa, S., MARIANI, J. & BERTHOZ, A. (2006) : Impaired sequential egocentric and allocentric memories in forebrain-specific-NMDA receptor knock-out mice during a new task dissociating strategies of navigation. *Journal of Neurosciences*, 26 (15) : 4071-4081.

Ouvrages

BERTHOZ, A., PETIT, J.-L. (2006) : « Physiologie de l'action et Phénoménologie », O. Jacob, 350 pp.

Chapitres d'ouvrages collectifs

2005

HICHEUR, H., GLASAUER, S., VIEILLEDENT, S. & BERTHOZ, A. (2005) : Head direction control during active locomotion in humans. In Wiener, S.I., Taube, J.S. (Eds.), *Head direction cells and the neural mechanisms of spatial orientation*. MIT Press.

2006

VIEILLEDENT, S., HICHEUR, H., DUCOURANT, T., KERLIZIN, Y. & BERTHOZ, A. (2006) : La génération des trajectoires locomotrices chez l'homme. In C. Thinus Blanc et J. Bullier, *Agir dans l'espace, Cognitique*, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, Chapitre 9, pp. 169-191.

*Conférences du professeur Berthoz sur invitation***2005**

— « Brain mechanism for spatial memory during navigation », Neuroscience Symposium. Trinity College Institute of Neuroscience : from molecules to mind. Dublin, Irlande, 6 juillet.

— « Neurobiological basis for navigation », Brain and Mind Forum. Copenhagen, Danemark, 10 septembre.

— « Bases neurales et modélisation de la perception de l'espace », Séminaire Cerveau et Cognition. École Polytechnique, Palaiseau, France, 5 octobre.

— « Contributions du système vestibulaire à l'orientation spatiale et à la locomotion : bases neurales et pathologie », 112^e Congrès de la Société Française d'oto-rhino-laryngologie et de chirurgie de la face et du cou. Palais des Congrès, Paris, 10 octobre.

— « La désorientation et l'anxiété spatiale : un modèle des relations entre décision et émotion », Journée de neuropsychologie Jean-Louis Signoret : Décisions et émotions, Neuropsychologie du comportement social. Hôpital Salpêtrière, Paris. 24 octobre.

— « The brain and reference frames for spatial orientation and spatial memory », International Interdisciplinary Workshop : « Frames of reference in spatial cognition ». ESPCI, Paris, 17 novembre.

— « Contrôle et motricité du regard, l'échange par le regard », Conférence franco-israélienne le fonctionnement du cerveau. Paris, 21 novembre.

— « Neural basis of spatial memory strategies during navigation », Réunion automnale de la Société italienne de Neuropsychologie. Bologne, Italie, 25 novembre.

— « From Cognition to movement », 6th International Congress, Neurorecovery. Institut pour la Recherche sur la Moelle épinière et l'Encéphale, Paris, 1^{er} décembre.

— « Neurosciences », Journées de la Recherche Franco-Japonaise. CNRS Paris, 2 décembre.

— « Principes communs et simulation mentale dans le contrôle du geste et de la locomotion », Journées d'Études annuelles sur l'Infirmité motrice cérébrale. Maison de l'UNESCO, Paris, 15 décembre.

— « Le cerveau, le mouvement et l'espace », Conférence plénière, Inauguration du Pôle 3C, Journée Scientifique Université de Provence. Marseille, 19 décembre.

2006

— « Brain mechanisms for spatial orientation and navigation », Conférence plénière, International Congress on Gait and Mental Function : the interplay between walking, behavior and cognition. Madrid, Espagne, 3 février.

— « Laws and simplifying principles governing natural movement. An inspiration for designing robots », Conférence plénière, BioRob 2006, Biomedical Robotics and Biomechatronics. Pise, Italie, 20 février.

— « Perception multi sensorielle et mémorisation spatiale au cours du déplacement : mécanismes cérébraux et dysfonctionnements », EuroConférences, Perception sensorielle : mécanismes fondamentaux et déficits chez l'homme. Institut Pasteur, Paris, 10 mars.

— « Les processus cognitifs impliqués dans la décision », Journée de BFD « Travail, connaissances et transmission, Une journée pour comprendre ». Maison des Arts et Métiers. Paris, 4 avril.

— « Rôle du système vestibulaire dans la mémoire spatiale », Réunion de FMC Troubles neurosensoriels ORL en pratique de ville. Hôpital Lariboisière, Paris, 8 avril.

— « Bases neurales et stratégies cognitives de la mémoire spatiale », Conférence plénière, Journée de Neurologie de Langue Française. Toulouse, 14 avril.

— Séminaire européen de l'UPMC « Improving the supervision of doctorates ». Université Pierre et Marie Curie, Paris, 28 avril.

— « Stratégies cognitives pour la mémoire de l'espace : cohérence, référentiels et agoraphobie », Journée « Le cerveau et l'espace : fonctions et pathologies ». Collège de France, Paris, 16 mai.

— « Orientations en physiologie de l'action », Conférence plénière, 29^e Congrès National de Médecine et Santé au travail. Lyon, 31 mai.

— « The role of the vestibular system in multisensory integration during navigation », International Multisensory Research Forum. Trinity College Dublin, Irlande, 19 juin.

Organisation de réunions

BERTHOZ, A. & KEMENY, A. : Séminaire « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, 12 janvier 2006.

BERTHOZ, A & PLAGNOL, A. : Journée « Le cerveau et l'espace : fonctions et pathologies ». Collège de France, Paris, 16 mai 2006.

Autres enseignements de A. Berthoz en 2006

— Master de Neurosciences, Paris VI.

— Master de Sciences cognitives, EHESS, Paris VI.

— Membre du Conseil pédagogique du Mastère de Sciences cognitives (École doctorale 3C), Paris.

Participation de A. Berthoz à l'organisation de la recherche

— Membre du Comité des Programmes scientifiques du CNES.

— Membre du Conseil consultatif pour la Science France/Japon.

— Membre du Conseil scientifique de l'Institut de Neurosciences de Trinity College à Dublin.

— Directeur de l'ACI Neurosciences intégratives et computationnelles, ministère de la Recherche et de la Technologie.

— Membre du Conseil scientifique de l'École Normale Supérieure, Paris.

— Président du Comité scientifique de l'œuvre Falret pour les maladies mentales.

— Membre du Conseil scientifique du Neuropole Ile-de-France.

— Membre du Conseil scientifique de l'institut Max Planck, Tuebingen.

Collaboration de A. Berthoz avec l'Industrie

— Contrats européens Ultimate et Claresco avec Renault (A. Kemeny).

— Contrat avec la Société Peugeot.

Contrats de recherche et coopérations internationales

— Programme de recherche clinique (PHRC) avec l'Assistance Publique sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans la rééducation de l'agoraphobie.

— FET Proactive initiative « Beyond Robotics », The fusion of Neuroscience and Robotics for augmenting human capabilities (Neurobotics). Coordinateur : P. Dario.

— Programme européen IST-2001-32115 BIBA (Bayesian Inspired Brain & Artefact). Coordinateur : P. Bessière (Gravir, Grenoble).

— Projet BACS : projet européen dans le cadre de Cognitive Systems.

— Projet « Asymétries cranio-faciales », Fondation Cotel-Académie des Sciences (avec Mme D. Rousié).

— Projet Nest Wayfinding n° 12959, FP6-2003-Nest-Path de la Communauté européenne.

— Projet Huper du programme de Robotique Robea du CNRS (avec le CEA Fontenay, Mme Pissaloux).

— Programme Human Frontier Science Program (Coordinateur B. de Gelder-Tilbury) « L'Expression corporelle des émotions ».