

## **Physiologie de la perception et de l'action**

M. Alain BERTHOZ, professeur

### **Espace des sens et Sens de l'espace**

Le premier cours a été consacré à la comparaison entre espace perçu, espace vécu et espace conçu. Lorsque nous nous rappelons un trajet nous avons le choix entre deux stratégies cognitives. La première dite égocentrée ou « de route » consiste à se rappeler les mouvements du corps, les kinesthèses, et à les associer avec des repères ou des objets rencontrés, des événements, des épisodes, plus ou moins agréables qui sont survenus pendant le trajet. La deuxième stratégie cognitive dite allocentrée utilise une carte mentale du trajet. Elle permet de trouver des raccourcis, de manipuler mentalement les trajets, etc. La première est plus proche de l'espace PERÇU et de l'espace VÉCU, la deuxième est plus proche de l'espace CONÇU et ABSTRAIT et isolé son contexte kinesthésique.

Nous avons d'abord évoqué les grandes théories géométriques concernant les fondements de la notion d'espace et les débats entre théories formalistes, intuitionnistes et conventionnalistes et soulevé le problème de la géométrie de l'espace perçu. Pour donner une idée de ce que la psychophysique apporte à ce débat nous avons examiné les travaux de l'école de Koenderink sur le caractère non Euclidien de l'espace visuel perçu et des données récentes sur l'espace tactile. De même, Gentaz et Hatwell ont trouvé une déviation dans l'organisation de l'espace haptique qui répond à la définition de ce que l'on appelle un effet d'oblique c'est-à-dire une différence dans l'estimation suivant la direction comme on trouve pour l'estimation des symétries. On a pu critiquer cette approche expérimentale de l'espace perçu car elle présuppose au fond une pensée mathématique de la spatialité. C'est à Poincaré que l'on doit d'avoir fait une véritable réhabilitation du corps et de l'action dans l'origine de la géométrie. Il s'oppose aux disciples de Pappus ou de Hilbert qui ont créé une mathématique formelle d'une efficacité remarquable, et dont l'objectif était de complètement dissocier les mathématiques de l'expérience sensible en insistant sur leur pensée sur le

concept d'*espace absolu*. Mais d'après Poincaré, qui rejoint Leibniz, ce mot est vide de sens : nous ne pouvons pas connaître la valeur absolue d'une distance.

Nous avons ensuite longuement analysé la pensée de H. Poincaré sur l'espace. Le premier point à mon avis important dans la pensée de Poincaré est cet intérêt pour une définition dynamique et relative de la notion d'espace perçu. J'avais déjà développé ces idées dans mon livre « Le sens du mouvement » (O. Jacob 1997) Poincaré lie le concept d'espace et action dans l'espace et attribue aux actes de préhension, de capture, de parade, un rôle fondamental dans ce qu'il appelle « les évidences des vérités géométriques ». Cette pensée est à rapprocher de celle exprimée récemment par G. Châtelet dans son ouvrage « Les enjeux du mobile » (Éditions du Seuil, 1993, p. 31) : « Ce concept de geste nous semble crucial pour approcher le mouvement d'abstraction amplifiante des mathématiques qui échappe aux paraphrases rationalisantes — toujours trop lentes —, aux métaphores et à leurs fascinations confuses et enfin, surtout, aux systèmes formels ». L'idée d'une relation profonde entre perception de la forme et action a été aussi suggérée par René Thom qui écrit : « la forme biologique suggère une action » (Mathematical Models of Morphogenesis, 1983, p. 166).

La dissociation entre espace « phénoménal » et espace physique est intéressante pour nous car elle nous donne l'occasion de vérifier que le cerveau ne traite pas de façon passive les données de la géométrie des objets et des éléments de l'environnement. Le cerveau a des règles d'analyse de la réalité géométrique qu'il impose, qu'il projette sur le monde. Les illusions visuelles en donnent des nombreux exemples de ce que j'appelle la tyrannie qu'exerce le cerveau sur la réalité de l'espace perçu. Le cerveau ne se contente donc pas d'interpréter le monde sensible selon des lois qui ne sont pas nécessairement Euclidiennes. Il impose donc au monde sensible ses lois et il est aussi confirmé que l'action joue un rôle fondamental dans les mécanismes grâce auxquels il lève les ambiguïtés présentes dans le flux optique. Mais il y a plus intéressant encore : la neuropsychologie moderne nous révèle qu'il peut y en plus avoir une dissociation entre l'espace perçu et l'espace d'action. Ils peuvent être traités en PARALLÈLE ce qui révèle sa neuropsychologie grâce à des dissociations entre les déficits perceptifs chez des patients ayant des lésions corticales. Dans son livre « Conceptions Scientifiques » (Flammarion, 1990, et en particulier p. 29), Einstein discute la façon dont est constituée notre conception de l'espace. Il approuve Poincaré qui, dit-il, a justement insisté sur le fait que nous distinguons deux sortes de changements dans l'objet matériel : « des changements d'état » et des « changements de position ». Ces derniers, disait-il, peuvent être corrigés par des mouvements arbitraires de notre corps.

Il procède à une définition de l'espace à partir de deux objets comme l'avait fait Poincaré en insistant sur le rôle fondamental des changements de position RELATIVE entre deux objets dans la constitution de l'espace. Il définit ainsi le contact entre plusieurs corps et propose que le second corps constitue ce qu'il appelle un prolongement quasi-rigide du premier qui peut servir de référence et

il définit l'espace comme la quintessence de ces prolongements quasi-rigides d'un corps qui constitueraient la base empirique de notre conception de l'espace. Dans la pensée préscientifique, dit Einstein, la croûte solide de la terre joue le rôle qu'a le corps de référence et de son prolongement. Le nom de géométrie indique que le concept d'espace est psychologiquement lié à la donnée du globe terrestre.

Nous avons aussi discuté le point de vue de Piaget sur le développement de la notion d'espace chez l'enfant. D'après lui, Poincaré aurait construit une théorie conventionnaliste, qui supposerait trop d'activités mentales, fines dans les premiers stades. Toutefois, Piaget n'arrive pas à se dissocier complètement des théories de Poincaré et il finit par admettre que : « néanmoins nous n'hésiterons pas à parler avec Poincaré de groupes pour désigner les conduites elles-mêmes de l'enfant, car elles ont une réversibilité qui permet de revenir au point de départ ». La seule difficulté de la description de Poincaré, dit-il, « est d'avoir négligé le fait que ces groupes demeurent longtemps à l'état pratique sans vraiment être des constructions mentales ». Si Piaget a critiqué Poincaré, il a été à son tour critiqué aussi par Merleau-Ponty qui lui fait les reproches suivants (Cours à la Sorbonne, 1949-1952, Verdier, p. 190-198) : « Pour Piaget chez l'enfant le monde PERÇU précède le monde CONÇU (par l'intelligence). Piaget refuse à ce monde perçu toute structure stable : c'est l'intelligence seule qui pourra introduire celle-ci. D'où sa croyance à une non permanence de l'objet dans le monde infantin. Il ne peut y avoir d'objet permanent au niveau de la perception avant la constitution d'un monde représenté. Les illusions d'optique sont une preuve de la labilité et de l'infidélité de la perception non étayée par l'intelligence ». Il l'accuse d'avoir essayé de traduire la perception dans le langage des opérations intellectuelles et d'avoir manqué la richesse réelle du monde perçu par l'enfant (la même critique est faite par Granger envers Lüneburg et Kondratiev). Il l'accuse donc d'un « intellectualisme classique ». Merleau-Ponty pense que Piaget ne considère pas assez l'espace vécu. Par exemple au sujet de la perception de la causalité chez Michotte, il écrit « pour Michotte lorsque l'enfant voit une boule de billard qui vient taper une autre boule précédemment immobile et qui bouge suite au (choc) il perçoit une causalité comme si la première boule avait entraîné la seconde ». Pour l'enfant, la boule qui bouge n'est pas un fragment de matière en déplacement mais un être qui agit sur un autre être. L'espace n'est pas perçu ou conçu, il est VÉCU. Nous avons ensuite examiné les théories qui privilégient l'aspect abstrait de la notion d'espace. De nombreux auteurs, et, en particulier, Gaston Granger font une défense et illustration du primat de l'abstraction comme fondement des mathématiques et particulièrement de la géométrie par opposition à de conceptions plus intuitives. Pour Granger par exemple le concept mathématique de spatialité. Il écrit : « Tel est le sens modéré du concept d'Hilbert : les concepts d'objets spatiaux sont bien des concepts d'objets mais ces objets ne sont pas directement ceux de l'expérience, ils en sont les "SIGNES" : dans ce contexte "penser c'est NOMMER" ». L'École

formaliste de la pensée spatiale est aussi illustrée par le livre de Gardenfors où l'on retrouve le concept de « représentation ».

À mon avis, la limite de la théorie de Gardenfors, est qu'en réduisant la métaphore à un transfert de structures géométriques il néglige l'essentiel de ce que la structure géométrique signifie pour le sujet agissant. L'erreur de Gardenfors et son appartenance à l'École formaliste sont illustrées par cette citation. « La perception produit des représentations d'objets dans un espace conceptuel, ces représentations peuvent être utilisées pour des transferts métaphoriques et la même façon que celles produites par des entrées linguistiques ». Il rejoint donc Granger qui soutient Hilbert pour qui « penser c'est nommer ». Le débat est donc encadré entre deux positions extrêmes celle attribuant un rôle essentiel de l'expérience, de l'action du corps sensible agissant et celle qui suppose l'existence d'entités abstraites indépendantes des sens. Une tentative de synthèse a été faite récemment par Gattis pour rassembler dans un livre des textes concernant la relation entre les schémas spatiaux et la pensée abstraite. Gattis essaye de suivre les traces de Pinker compatibles avec les théories constructivistes de Piaget et les idées de Poincaré.

Nous avons complété cette brève revue par des rappels sur les théories gestaltistes et « écologistes » comme celle de Turvey ou de Gibson qui a essayé de trouver une solution par la notion de perception directe. Nous avons terminé ce premier cours par une évocation de l'art de la mémoire. Les livres de Yates ont remarquablement décrit l'usage de l'espace pour la mémoire et Carruthers a même proposé que cette spatialisation de la mémoire dans des palais mentaux permette, en réalité, non seulement un stockage des données mémorisées mais la découverte d'associations nouvelles et de chemins nouveaux qui lient les concepts. L'espace serait ainsi un outil pour la créativité grâce à l'utilisation de stratégies cognitives permettant des détours et des chemins nouveaux dans la pensée comme dans la navigation.

Le deuxième cours a été consacré à la pathologie de la perception de l'espace. Une catégorie importante de déficits est celle des déficits de la perception visuelle : les agnosies visuelles. Les malades peuvent « voir » les formes mais ne les re-connaissent pas ou ne peuvent pas leur attribuer nombre de propriétés. Thucydide décrivit déjà en 430-429 avant J.-C. des agnosies chez des patients après une épidémie de peste à Athènes, et bien qu'Hippocrate fit allusion à cette maladie dans son livre, les premières descriptions modernes furent faites par Quaglino en 1867. Munk en 1877 remarqua que des chiens pouvaient voir des objets mais ne les reconnaissaient pas et nomma ce déficit « cécité corticale ». C'est Freud qui inventa le terme « d'agnosie visuelle » et utilisa ce concept comme Wernicke. La période de 1880 à 1900 vit fleurir les travaux sur ce sujet de Charcot, Wilbrand, Déjérine et des écoles de neurologie française et allemande. Aujourd'hui la neuropsychologie permet d'établir une sémiologie des agnosies en relation avec les lésions cérébrales. Nous avons examiné l'agnosie aperceptive, l'agnosie visuelle associative (agnosie visuelle aux objets), l'ataxie

optique, la simultanagnosie (difficulté d'assembler les éléments d'une même scène visuelle en un tout signifiant), la prosopagnosie (agnosie des visages), et des agnosies qui concernent plus particulièrement des opérations mentales sur l'espace comme les agnosies de transformation (il s'agit d'une difficulté à changer de point de vue). Les patients ne reconnaissent pas un objet s'il ne le voit pas sous un angle habituel) ou l'agnosie de localisation (les sujets sont incapables de percevoir par la vue seule la position et la distance des objets) ou encore la dysmorphosie (certains malades voient les objets déformés). Elle témoignerait de déficit de référentiels locaux liés aux objets eux-mêmes. Parmi les formes et les objets que nous percevons et identifions un des plus importants est notre propre corps. La perception de l'espace du corps subit des déficits lors de troubles neurologiques. Par exemple certains malades perdent la capacité de localiser les parties de leur corps (auto-topo-agnosie). Mais il leur arrive aussi de penser qu'ils ont disparus. Il ne s'agit donc pas seulement d'un problème de localisation mais aussi de la perception consciente de l'existence même du membre. Parfois les patients perdent la capacité de localisation des parties du corps sur commande verbale : une malade de Pick ne pouvait trouver son oreille gauche lorsqu'on lui demandait de la localiser et pense qu'elle est sur la table. Elle pense avoir perdu ses membres. Un malade de Gertsman, à qui l'on doit la description d'un syndrome qui porte son nom, disait de ses oreilles qu'elles devaient avoir été jetées. Elle ne pouvait pas trouver ses yeux et disait n'en avoir aucun. Toutefois des malades qui ne peuvent désigner des parties du corps sur eux même, sont capables de le faire lorsqu'ils sont touchés par l'examineur. Ces patients ne peuvent décomposer un tout en ses parties. Le trouble ne serait donc pas de localisation spatiale mais de décomposition d'un tout en parties. On voit l'importance du problème de la construction par le cerveau d'une relation entre le local et le global. Une patiente atteinte d'une maladie d'Alzheimer ne pouvait désigner les parties de son corps soit si on les nomme ou si on les désignait de façon non verbale sur elle-même, mais elle pouvait très bien désigner des objets attachés à ces parties. Ce modèle propose une distinction entre représentations du corps spatial (cerveau droit) et sémantique (cerveau gauche) d'autre part. Parmi les troubles des relations entre le corps et l'espace il faut mentionner la négligence spatiale qui atteint principalement les patients ayant des troubles du cortex pariétal droit mais aussi du cortex frontal droit. Il est bien connu qu'ils ne dessinent qu'une partie d'une scène, qu'ils ne lisent que la moitié du cadran d'une horloge, ils ne mangent que la moitié de l'assiette, ils ne peignent que la moitié d'un objet. D'où une distinction entre une forme de négligence ayant pour référentiel les objets et une autre forme ayant pour référentiel l'espace entier. Les patients ont en général une déviation vers la droite de l'espace perçu et des biais dans la perception des symétries. Plusieurs modèles ont été proposés pour rendre compte de cette distorsion de l'espace et la discussion la plus difficile concerne la relation entre la perception des objets et de l'espace. Karnath propose l'idée que le cerveau construit ce qu'il appelle une carte intégrée espace-objet. Karnath a de plus proposé l'idée que la négligence n'est pas seulement due à des lésions

de la jonction temporo-pariétale ou du cortex pariétal inférieur mais que la région cruciale serait le cortex temporal supérieur. Récemment, Rossetti a montré que la prismatisme peut induire une amélioration sensible et durable. Il y a donc là un remarquable modèle de plasticité sensorimotrice qui n'a pas révélé tous ses mystères.

Par exemple un malade décrit par Guariglia *et al.* avait aussi une lésion qui atteignait le lobe temporal du noyau caudé et du noyau lenticulaire qui comprend le putamen et le globus pallidus. Pas de lésion pariétale, pas de négligence personnelle perceptive ou motrice, aucun des signes associés d'habitude à l'hémi-négligence. Mais, si on lui demandait de décrire en l'imaginant une place qui lui était familière, il omettait des repères sur la gauche de son point de vue. Surtout si on lui demandait de changer de point de vue, il omettait encore des repères sur la gauche. L'idée de cette équipe est que ce patient présente une dissociation remarquable entre la capacité d'imaginer mentalement des lieux complexes, qui est perturbée et un espace perceptif visuel intact. Selon eux, il s'agit d'un déficit d'organisation d'un ensemble d'éléments complexes d'une mémoire à long terme dans un référentiel égocentré mais en ayant reconstruit les relations allocentrées des éléments entre eux. À partir de cela, ils supposent qu'il existe dans le cerveau quelque part dans le lobe frontal un module spécialisé qui serait responsable de cette mise en relation des coordonnées ego (pariétale) et allocentrée (temporale). La pathologie suggère donc un réseau pariéto-frontal impliqué dans la négligence. Nous avons fait avec l'équipe de neuropsychologues de Rome un travail sur ce sujet. Le lobe temporal semble bien impliqué dans l'aspect allocentré de la perception de la relation entre le corps et l'espace. Depuis longtemps, des déficits dans la représentation et la mémoire de l'espace ont été mis en évidence dans le lobe temporal et ont suggéré le rôle du parahippocampe dans la mémoire spatiale. L'imagerie cérébrale a confirmé le rôle du parahippocampe dans le traitement de l'espace. Il est donc important de comprendre la différence de rôle de l'hippocampe et du parahippocampe dans ces fonctions. Il est donc bien connu que la formation hippocampique droite est impliquée dans la mémoire spatiale principalement allocentré mais peu de données existent encore aujourd'hui sur l'hippocampe gauche. Dans un travail que nous avons fait avec l'équipe de B. Mazoyer et M. Denis nous avons trouvé une activation de l'hippocampe gauche dans une tâche de mémoire de route c'est-à-dire égocentrée et séquentielle.

Le troisième cours a été consacré aux relations entre le corps et l'espace. En effet la mise en relation de l'espace du corps et du corps dans l'espace implique que le cerveau ait résolu en particulier de problèmes de référentiels. En effet, les capteurs sensoriels, proprioception musculaire, articulaire, sens tactile, vision, audition, capteurs vestibulaires travaillent tous dans des systèmes de référence différents et codent l'espace selon des géométries différentes. De plus on sait que, dans le cerveau, les référentiels utilisés par le colliculus supérieur, la formation hippocampique, le putamen, le cortex pariétal, sont tous différents. Ainsi la

reconstruction d'une cohérence spatiale dans les relations entre le corps et l'espace est un problème complexe de mise en registre, au sein d'une même structure, comme le colliculus, des informations sensorielles multiples somatiques, visuelles, auditives et vestibulaires. La complexité de cette neurocomputation est en partie réduite par des mécanismes de simplification que nous avons décrits. Par exemple la ségrégation des variables de mouvement (longue, forces, direction) qui sont contrôlées ; la correspondance géométrique entre les espaces des capteurs (par exemple entre le système visuel accessoire qui est sensible au mouvement et la géométrie des capteurs vestibulaires). Le contrôle du mouvement par des variables globales et non locales, la loi de Listing, la loi d'antiphase, la loi de la puissance  $2/3$  qui relie courbure d'un mouvement vitesse tangentielle, etc. Nous avons étudié les relations entre la proprioception et la vision en montrant par exemple le rôle de calibration qu'exerce la vision, sur les données de la proprioception, musculaire et articulaire, la mise en correspondance des champs récepteurs visuels et tactiles, la flexibilité des champs récepteurs tactiles en fonction de l'utilisation d'outils. La simplification est aussi assurée par l'utilisation du système vestibulaire pour stabiliser la tête dans l'espace et crée un référentiel mobile au cours de la locomotion ou des mouvements complexes du corps qui permet la coordination des multiples degrés de liberté du corps à partir de la tête qui est ainsi constituée en une plate-forme de guidage stabilisée.

Mais le cerveau peut choisir les référentiels adaptés à chaque activité. Par exemple il peut choisir d'utiliser un référentiel égocentré ou allocentré et nous avons montré des travaux d'imagerie cérébrale qui établissent l'existence d'un système cortical (pariéto-frontal principalement à droite) spécialisé dans la perception égocentrée des relations du corps et de l'espace et un autre système, en partie incluant le premier mais en plus impliquant le lobe temporal et impliqué dans la perception allocentrée de l'espace. Les données de neurophysiologie chez l'animal et chez l'homme confirment aussi aujourd'hui l'existence de systèmes spécialisés dans le traitement des variables distinctes du mouvement du corps (par exemple un système neuronal qui implique le cortex vestibulaire (jonction pariéto-temporale) et principalement impliqué dans la perception des rotations, un autre qui contient des neurones de direction de la tête (avec des régions comme les corps mamillaires, le thalamus, le presubiculum, le cortex rétrospécial) et constitue le système fondamental d'orientation statique, enfin les neurones de place de l'hippocampe contribuent au codage des lieux en relation avec l'environnement et la mémoire épisodique. Les travaux évoqués dans les premiers cours ont clairement établi le rôle de l'hippocampe dans le codage de l'espace et la mémoire spatiale. Nous avons consacré un cours pour faire le point sur les données récentes concernant cette structure en particulier nous avons évoqué les arguments qui lui attribuent soit une fonction comme « carte cognitive » soit plutôt pour la mémoire épisodique soit encore pour ce que j'ai proposé d'appeler la « mémoire topokinesthésique », c'est-à-dire, comme nous l'avons rappelé au début du cours, la stratégie de route plutôt que la stratégie de carte ou de

survol. Nous avons d'abord rappelé l'histoire des théories principales concernant l'implication de l'hippocampe au sein du système limbique dans les fonctions spatiales et le contrôle des émotions et les données pionnières de Penfield puis de Gloor sur l'évocation de scènes spatiales, mais surtout de rappels de scènes vécues dans un contexte spatial lors de stimulations du lobe temporal médian. Nous avons aussi examiné des données récentes de l'équipe de Peigneux en France sur l'activation du lobe temporal médian lors d'activité de rêve évoquée par un entraînement diurne (Parahippocampe en particulier). Ces données sont aujourd'hui complétées par les travaux que nous réalisons en imagerie par IRM fonctionnelle avec l'équipe du SHFJ à Orsay (D. Lebihan) et le Laboratoire de Neuropsychologie de Rome (Pr Pizzamiglio) sur la manipulation mentale des référentiels spatiaux. Nous avons par exemple réalisé une étude en IRM qui concerne la perception des distances et qui utilise la réalité virtuelle. Des sujets devaient estimer si deux objets étaient plus près soit de leur propre corps (référentiel égocentré) soit d'un troisième objet (ou de la plus longue aile d'un palais virtuel) (référentiel allocentrique). Les résultats indiquent une fois de plus une implication spécifique du lobe temporal et permettent d'identifier avec précision les structures impliquées et en particulier la différence de fonction entre l'hippocampe et le parahippocampe.

Nous avons aussi évoqué des résultats nouveaux obtenus en coopération avec le département de Neurologie de l'Hôpital de la Salpêtrière (Pr M. Baulac) concernant l'effet de résections chirurgicales de l'hippocampe chez des patients épileptiques sur leur capacité à mémoriser un trajet. Ici aussi nous avons employé la réalité virtuelle pour faire naviguer des sujets dans un labyrinthe et nous leur avons demandé de mémoriser les objets et les virages au cours de leur navigation. Un résultat particulièrement intéressant est le fait que les sujets ayant une lésion de l'hippocampe gauche ont des difficultés à mémoriser l'ordre dans lequel ils ont rencontré les objets. Le déficit est aussi observé pour l'association entre les objets et les mouvements de rotation du corps dans les virages (mémoire topokinesthésique d'association objet-lieu-action).

Nous avons alors proposé une nouvelle théorie qui suggère la latéralisation chez l'homme des fonctions de l'hippocampe, l'hippocampe droit étant impliqué dans le codage allocentrique et le gauche dans la codage égocentré de type route avec une rôle particulier concernant l'organisation séquentielle des événements et des mouvements. En réalité les différentes stations corticales impliquées dans le traitement des données spatiales en coopération avec l'hippocampe sont organisées en réseau. Nous avons examiné quatre régions importantes, le cortex pariétal, le cortex frontal. Les données concernant la négligence spatiale et préfrontal et le cortex rétrospécial.

Nous avons d'abord étudié les données de neurophysiologie et de neuropsychologie qui suggèrent que le cortex pariétal est essentiellement concerné par la transformation de données de nature égocentrées et nous avons présenté les résultats du travail fait avec P. Kahane à Grenoble qui a permis de réaliser une



réévaluation du cortex vestibulaire grâce à l'analyse des perceptions de patients épileptiques subissant une exploration fonctionnelle par électrodes implantées avant la chirurgie de l'hippocampe. Nous proposons le concept de cortex vestibulaire temporo-péri-sylvien pour désigner une série d'aires du lobe temporo-pariétal dont la stimulation induit des expériences de vertiges, sorties du corps, et diverses illusions de mouvement. Mais l'essentiel de ce cours a été consacré à la description des modules pariéto-frontaux qui sous tendent le traitement égocentrés de l'espace. Ces modules sont maintenant connus grâce à des expériences d'imagerie cérébrale ou d'enregistrement d'activité électrique chez le singe. La réalité virtuelle a aussi montré qu'il existe une différence entre les sexes : dans une tâche de navigation virtuelle dans un labyrinthe les femmes activeraient plus ces modules alors que les hommes activeraient plutôt les modules temporaux, ceci reflétant une préférence des hommes pour des stratégies cognitives de type allocentrées. Un autre paradigme (Burgess et coll.) a permis de décrire le réseau cortical impliqué dans la navigation : des sujets se promènent dans une ville virtuelle jusqu'à ce qu'ils la connaissent bien. Ils suivent ensuite une route indiquée sur le sol par des flèches. Ils rencontrent de personnes sur le chemin et obtiennent un objet de ces personnes en appuyant sur un bouton qui fait apparaître l'objet. On leur apprend à répondre à des choix forcés concernant ces épisodes (en choisissant de se rappeler la place ou l'objet par exemple). Dans le scanner FMRI ils circulent d'abord dans la ville en rencontrant des personnes qui leurs donnent les objets. Puis on commence le scanning en leur posant des questions et en les plaçant dans des endroits de la ville où ils ont rencontré quelqu'un. On présente alors deux objets et on leur demande d'identifier : a) un lieu ; b) une personne ; c) un objet ; d) une largeur en leur posant des questions. Quel objet avez-vous reçu à cet endroit ? Quel objet avez-vous reçu de cette personne ? Quel objet avez-vous reçu ? Lequel des deux objets est le plus large ? Les aires activées ont été le cortex pariétal postérieur, le precuneus, le cortex pariéto-occipital, rétrospénial, le gyrus para-hippocampique, l'hippocampe, le cingulum médian-postérieur, le cingulum antérieur, le cortex préfrontal dorsolatéral antérieur et ventral avec une participation différentes suivant les fonctions testées. Ces données d'imagerie et une modélisation mathématique permettent de proposer une architecture fonctionnelle de ces réseaux. Par exemple dans cette architecture le cortex rétrospénial serait impliqué dans la transformation entre représentation ego (pariéto-frontale) et allocentrée (pariéto-temporale). Mais il ne s'agit encore de d'une esquisse de théorie qui doit être complétée par exemple par les données obtenues chez le rat. Des lésions du cortex rétrospénial ont suggéré un rôle complexe de cette structure dans l'orientation spatiale pendant la navigation qui dépasse sans doute le simple rôle de transformation de coordonnées. Il est clair que le cortex préfrontal est essentiel dans notre capacité de manipuler l'espace et dans des tâches de changement de points de vue par exemple. Nous avons résumé les données disponibles concernant cet aspect du fonctionnement du cortex préfrontal.

Le sixième cours a été consacré à un aspect de la manipulation mentale de l'espace : le problème du changement de point de vue. Il existe une pathologie particulière concernant la possibilité de changer de point de vue. Cette opération mentale suppose que l'on fasse une sorte de rotation mentale de soi-même par rapport à l'environnement ou à un objet dans l'environnement tout en gardant une perspective globale sur l'environnement. Par conséquent des agnosies comme la simultanagnosie induisent sans doute des déficits sur cette opération. Il a été montré par Guariglia que des patients ayant des lésions du lobe frontal ont un déficit dans la capacité de décrire une place dans une ville d'un point de vue nouveau (négligence représentationnelle) sans négligence perceptuelle, et un patient ayant une lésion de l'hippocampe (le patient Jon décrit par King *et al.* 2002) à des difficultés dans une tâche de description d'une place lorsqu'on change son point de vue. Après un accident vasculaire impliquant le thalamus droit un patient (décrit par Ortigue *et coll.* 2001) présentait une négligence spatiale purement représentationnelle à gauche. Il était remarquable qu'il ne pouvait pas changer de point de vue de façon égocentrique (lorsqu'on lui demandait de décrire les villes le long du lac de Genève d'un point de vue personnel) mais avait une capacité sauvegarder de changer de point de vue de façon allocentrique (sans qu'un point de vue soit imposé). L'existence d'un processus mental spécifique de l'activité de changement de point de vue est attestée par de nombreux travaux de psychologie expérimentale que nous avons résumés et nous avons décrits un travail fait avec Amorim, dans notre laboratoire, qui a consisté à comparer deux stratégies cognitives pour changer de point de vue de faire une réactualisation de la vue d'un objet ; une stratégie consiste, lorsqu'on marche et qu'on veut réactualiser la vue d'un objet en fonction de la localisation dans une pièce, soit garder l'objet en mémoire activement et en réactualiser l'apparence en continu, mais on peut aussi se concentrer sur le trajet que l'on effectue et ne fait la réactualisation qu'à la fin en combinant la mémoire du trajet et l'apparence initiale de l'objet. Cette dernière stratégie demande un peu plus de temps. Les bases neurales des changements de point de vue ont été analysées par l'imagerie cérébrale dans le cadre d'une coopération avec le centre de Julish (Pr H. Muller Gartner). Les sujets voyaient une lampe dans une pièce en réalité virtuelle, dans un deuxième temps voyaient la pièce d'un nouveau point de vue. On changeait éventuellement la lampe de place. Les sujets devaient dire si la lampe était à la même place dans la pièce. La comparaison entre les aires du cerveau activées dans une tâche de contrôle et dans la tâche exigeant un changement de point de vue a révélé un système d'aires supportant des modules pariéto-frontaux impliqués dans la mémoire visuo-spatiale de travail, un système pariéto-temporal et des aires préfrontales. Une preuve de l'implication de la formation hippocampique dans les mécanismes du changement de point de vue a été apportée par une étude sur des patients ayant subi des résections hippocampiques. Le paradigme consistait à utiliser une poupée placée dans la pièce où se trouvait la lampe citée ci-dessus. La direction du regard de l'avatar constituait un amorçage du point de vue nouveau sous lequel la pièce allait être présentée à l'image

suivante. La direction du regard de l'avatar permettait donc au sujet de prédire le prochain point de vue. Cette anticipation améliorait la performance des sujets sains mais chez les patients la différence entre le nouveau point de vue et l'ancien n'est pas détectée. Imprécision dans l'anticipation du nouveau point de vue et, en particulier pour les patients ayant des lésions gauches, Le sujet n'avait aucune idée de ce que l'avatar « voyait ». On ne peut considérer les bases neurales du traitement de l'espace et surtout le sens de l'espace perçu et de l'espace vécu sans étudier les relations entre émotion et perception de l'espace. Nous avons pris quelques exemples de centres du cerveau importants dans le traitement des émotions et montré comment leur fonction concernant l'attribution d'affect ou de valeur pouvait être combinée avec les traitements de l'espace. Nous avons successivement analysé la physiologie de l'amygdale, du noyau accumbens du cortex orbito-frontal et le cortex cingulaire antérieur. La liaison entre les mécanismes des émotions et ceux du traitement de l'espace est particulièrement intéressante dans le cas de l'anxiété spatiale. De troubles puissants comme l'agoraphobie ou la panique d'origine spatiale sont induits par des discordances interne ou externes et une difficulté pour le cerveau à résoudre le problème de la cohérence entre les informations des sens sur l'environnement et les rapports du corps avec celui-ci et le souvenir d'expériences passées. Nous avons montré les résultats de deux études faites chez l'homme et la femme d'une part et chez la souris d'autre part, sur ce sujet.

A.B.

#### SÉMINAIRES DES COURS DU PROFESSEUR ALAIN BERTHOZ

— Pr Heinrich BÜLTHOFF (Max Planck Institut, Université de Tübingen, Allemagne). Le codage égocentrique dans la perception visuelle et haptique des objets. Discutant : Pr D. BENNEQUIN.

— Pr Béatrice DE GELDER (Laboratoire de Neurosciences Cognitives, Tilburg, Pays-Bas). Schémas d'action et espace affectif. Discutant : Dr. R. LEVY.

— Pr Tamar FLASH (Weizman Institute, Rehovot, Israël). La formation de trajectoires par le geste : Planification, perception et apprentissage. Discutant : Pr G. LONGO.

— Pr Jean PETITOT (EHESS, CREA, École Polytechnique, Paris). La neurogéométrie de la vision. Discutant : Dr Y. FREGNAC.

— Pr Jan KOENDERINK (Institut Helmholtz, Université d'Utrecht, Pays-Bas). Mouvements mentaux dans l'espace pictural. Discutant : Dr M. WEXLER.

— Pr Bernard TEISSIER (Institut de Mathématiques, Université Paris VII). De la donnée a priori à la construction de l'espace. Discutant : Dr J. DROULEZ.

— Dr Neil BURGESS (University College, Londres, Grande-Bretagne). L'hippocampe, l'espace et la mémoire. Discutant : Pr S. SAMSON.

— 12, 19, 26 mai et 2 juin 2003 : M. A. DAMASIO (Professeur à l'Université d'Iowa, USA, Professeur adjoint à l'Université La Jolla, Californie, USA) invité par les Professeurs BERTHOZ et J.-P. CHANGEUX au Collège de France, Paris. Leçons sur le sujet suivant : Emotion, Memory and Consciousness : 1. Emotion I, 2. Emotion II, 3. Memory, 4. Consciousness.

— 20-21 mai 2003 : Séminaire commun à la Chaire d'Anthropologie de la Nature (Pr Ph. DESCOLA, LAS) et à la Chaire de Physiologie de la Perception et de l'Action (Pr A. BERTHOZ, LPPA), Collège de France. « Stratégies Cognitives et orientation spatiale ».

— 25 juin 2003 : Pr David G. AMARAL (Université de Davis, Californie, US) invité par le Professeur Alain BERTHOZ au Collège de France, Paris. Neuroanatomy of the hippocampal formation : Implications for theories of memory.

#### TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

### 1. BASES NEURALES DES MOUVEMENTS D'ORIENTATION : ÉTUDE MORPHOFONCTIONNELLE

PARTICIPATION DES NEURONES TONIQUES INHIBITEURS AU CONTRÔLE DE LA SYNERGIE  
ŒIL-TÊTE : DONNÉES DE L'ANATOMIE FONCTIONNELLE

A. GRANTYN, A.M. BRANDI, M.A. THOMAS (LPPA), B. KUZE (Université de Gifu)

Quand les cibles choisies pour l'orientation sont excentrées, les sujets effectuent le déplacement du regard par les mouvements synergiques des yeux et de la tête. Au niveau de l'entrée du système de contrôle c'est le signal de l'erreur rétinienne qui est disponible pour guider le mouvement. Par conséquent, la question se pose à savoir comment à partir d'un tel signal global on obtient les signaux spécifiques, nécessaires au contrôle de deux effecteurs très différents (œil, tête). Les travaux actuels convergent pour affirmer que la spécification des signaux dirigés vers les noyaux moteurs extra oculaires et ceux des muscles de la nuque s'effectue au niveau des neurones de la formation réticulée du tronc cérébral. Cependant, le substrat neuronal de ce processus est encore loin d'être clarifié.

Nous avons examiné, chez les chats « tête libre », une population des neurones bien connus comme un des modules du générateur saccadique. Ce sont les Neurones Toniques Inhibiteurs (NTI) qui arrêtent leur décharge pour la durée des saccades. Ils jouent le rôle permissif dans l'exécution des saccades car, par l'effet de désinhibition ils rendent possible la décharge des neurones excitateurs agissant sur les motoneurones extra oculaires. Notre intérêt pour cette population provient de deux observations. Premièrement, nous avons rencontré les NTI (Cx-NTI) dont la durée des pauses était beaucoup plus grande que la durée des

saccades individuelles. Deuxièmement, le marquage intracellulaire des NTI a démontré (Ohgaki *et al.*, 1987) que leurs terminaisons engagent les aires de la formation réticulée connues pour leurs projections spinales. On pourrait donc supposer que certains NTI participent au contrôle des mouvements de la tête. Nous avons débuté notre travail par la recherche des connexions éventuelles des OPN avec les neurones réticulo-spinaux (RSN) en utilisant l'approche anatomo-physiologique chez le chat éveillé et libre des mouvements de la tête. Les RSN ont été préalablement marqués par l'injection du marqueur rétrograde (HRP) dans la moelle épinière au niveau des segments cervicaux C2-3. Ensuite nous avons employé les micro-électrodes remplies de Biocytin pour enregistrer l'activité des NTI et pour effectuer en même temps leur marquage antérograde. Cette technique a assuré l'identification fonctionnelle exacte des sites d'injection. Une double procédure histochimique a été employée pour la révélation de l'HRP et de Biocytin. Dix NTI ont été sélectionnés pour la reconstruction tri-dimensionnelle (NeuroLucida) de leurs axones et de leurs terminaisons dans la formation réticulée. Les appositions des boutons synaptiques aux corps cellulaires et dendrites proximaux des RSN, identifiés par le marquage rétrograde, ont pu être détectés sur cinq NTI. Les RSN contactés étaient localisés dans les noyaux réticulaires connus pour leurs projections vers les motoneurons de la nuque. Cependant, leur nombre était faible : chaque NTI ne contactait que 1 — 11 RSN. Pour résumer, nos expériences ont révélé les connexions directes des NTI avec les RSN. Du point de vue anatomique, ces connexions doivent être qualifiées comme très faibles. Ceci est peu compatible avec un contrôle strict de la durée des mouvements de la tête mais est suffisant pour assurer la contribution des NTI à la modulation de l'excitabilité des RSN. Cette conclusion est en accord avec l'analyse préliminaire des relations entre l'activité des Cx-NTI et les mouvements de la tête. La modélisation devrait prendre en compte que les NTI, une population considérée comme une composante du générateur des saccades oculaires, n'est pas homogène et certains de ses neurones peuvent participer à l'extraction des signaux destinés au contrôle modulateur des mouvements de la tête.

## 2. BASES NEURALES DES MOUVEMENTS OCULAIRES ET DES INTERACTIONS VISUO-VESTIBULAIRES CHEZ LE PRIMATE W. GRAF, F. KLAM, V. PREVOSTO

Nous avons décrit des signaux neuronaux relatifs au mouvement de la tête dans les aires intrapariétales ventrale et médiale (VIP et MIP, respectivement), chez le macaque vigile, tête fixe, soumis à des rotations horizontales passives. Les neurones portent des signaux vestibulaires par rapport d'accélération, vitesse et position. Nous avons aussi analysé 106 neurones enregistrés dans ces deux aires corticales, au cours de mouvements de la tête passifs et également lors de mouvements générés par l'animal lui-même (mouvements actifs). Ces derniers sont obtenus en entraînant l'animal, qui a la tête libre, à suivre du regard une cible ponctuelle qui se déplace dans le plan horizontal. Dans les intervalles où les

mouvements de poursuite sont constitués presque exclusivement de mouvements céphaliques, une corrélation claire est établie entre le mouvement de la tête et la réponse des neurones. Si tous les neurones pariétaux postérieurs qui possèdent des réponses vestibulaires sont également sensibles à la position des yeux, leur activité relative à la poursuite oculaire est presque négligeable pour les vitesses de mouvements utilisées dans nos expériences (jusqu'à 20°/s). Par ailleurs, nous avons développé un paradigme expérimental nouveau, la méthode du *mouvement rejoué*, qui permet une comparaison directe de la réponse neuronale au mouvement actif et au mouvement passif. Dans ce cadre, les animaux sont laissés libres de réaliser des mouvements de la tête à l'obscurité totale. Puis, leur tête est fixée, et c'est la trajectoire des mouvements actifs réalisés précédemment qui est utilisée pour contrôler la table tournante, ce qui permet d'obtenir une stimulation passive quasiment identique à la stimulation active. Dans ces conditions, les caractéristiques de réponse des neurones intrapariétaux sont très variables, s'étendant d'une extinction totale de la réponse vestibulaire pendant le mouvement actif, à une réponse forte exclusivement pendant le mouvement actif. Dans la plupart des cas, les neurones répondent plus fortement pendant le mouvement passif que pendant le mouvement actif. Plus étonnant est le fait qu'environ un tiers des neurones exhibent un changement de direction vestibulaire préférée en fonction du type de mouvement, par exemple un neurone de type I pendant le mouvement actif devient de type II pendant le mouvement passif, etc. Ainsi, nous suggérons que le rôle des neurones vestibulaires pariétaux est à définir dans le cadre des représentations sensorielles de l'espace, plutôt que dans celui des mouvements réflexes ou dans celui du contrôle moteur. Par rapport de nos études de traçage transneurale avec le virus de la rage, nous avons injecté le traceur pour le premier fois dans une aire intracorticale, i.e., l'aire VIP.

### 3. MÉCANISMES NEUROPHYSIOLOGIQUES DU CONTRÔLE DES MOUVEMENTS DU REGARD DANS L'ESPACE NATUREL 3D

#### 3.1. DÉVELOPPEMENT DE LA VITESSE ET PRÉCISION DES MOUVEMENTS DES YEUX Q. YANG, Z. KAPOULA

Pour explorer le monde visuel 3D nous effectuons des saccades (mouvements horizontaux et verticaux) et des vergences (convergence ou divergence des yeux) pour ajuster l'angle des axes optiques selon la distance des objets. Nous avons examiné la vitesse, la durée et la précision des saccades et de la vergence chez des enfants normaux (4,5-12 ans) et chez des adultes normaux (22-44 ans). Aussi bien que la vitesse de la saccade, la vitesse de la vergence (convergence et divergence) atteint le niveau adulte dès l'âge de 4,5 ans et il n'y a aucun changement significatif pour les âges étudiés (4,5-44 ans). L'interaction réciproque entre saccade et vergence connue chez les adultes, c'est-à-dire l'accélération de la vergence par la saccade et la décélération de la saccade par la vergence existe aussi chez les jeunes enfants dès l'âge de 4,5 ans. La précision des

mouvements oculaires est aussi bonne pour tous les âges, bien que plus variable pour les enfants en dessous de 8 ans. L'ensemble des résultats suggère une maturation quasi complète des structures du tronc cérébral qui contrôlent la vitesse de la saccade, de la vergence et de leur interaction, et la précision de ces mouvements

### 3.2. DÉVELOPPEMENT DE LA COORDINATION BINOCULAIRE DES SACCADÉS

Q. YANG, Z. KAPOULA

Il existe une controverse théorique sur la nature innée ou acquise de la coordination binoculaire de la saccade qui remonte au débat entre Helmholtz et Hering (1868). Dans cette étude nous avons comparé la coordination binoculaire des saccades en vision lointaine (150 m) et en vision proche (20 m) chez l'adulte et chez l'enfant sain. Nous avons observé une différence significative dans la qualité de la coordination binoculaire de la saccade entre les adultes et les enfants : les saccades des enfants sont moins bien accordées surtout en vision proche. La coordination de deux yeux pendant la période de fixation post-saccadique est moins bonne chez les enfants que chez les adultes. La coordination binoculaire se développe lentement, atteignant le niveau adulte vers 10-12 ans. Ainsi, cette étude suggère que la coordination binoculaire de la saccade dépend du développement cortical de l'enfant. Toutes ces études montrent que le développement visuo-moteur de l'enfant n'est pas complètement développé à l'âge de 6 ans, âge auquel il apprend à lire. Cela appelle pour une particulière attention par rapport à l'apprentissage de la lecture ; la lenteur développementale doit être prise en compte et distinguer des vrais déficits neuro-ophtalmologiques.

### 3.3. CARACTÉRISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES SACCADÉS, DE LA VERGENCE ET DES MOUVEMENTS COMBINÉS CHEZ L'ENFANT

#### 3.3.1. ENFANTS AVEC VERTIGES

M.P. BUCCI, Z. KAPOULA ; Étude effectuée à l'hôpital Robert Debré, en collaboration avec le Dr S. WIENER-VACHER (service ORL) et le Dr D. BRÉMOND-GIGNAC (service d'ophtalmologie)

Wiener-Vacher et collaborateurs (service ORL) ont observé qu'environ 5 % d'enfants présentant des vertiges et des céphalées surtout frontales, montraient aux tests orthoptiques un déficit de la vergence. Une rééducation orthoptique de la vergence a permis la disparition des vertiges et des troubles d'équilibre chez ces enfants (Anoh-Tenon *et al.* 2000). Les sensations de vertiges éprouvés par des enfants avec déficit de vergence pourraient être dues à un mauvais ajustement du réflexe vestibulo-oculaire car on sait que la compensation vestibulaire est fonction de l'angle de la vergence (Leigh et Zee, 1999). Toutefois, aucune étude précise n'a été faite en enregistrant les différents sous-systèmes oculomoteurs chez ces enfants. Notre premier objectif était de définir les anomalies de la vergence oculomotrice avec une méthode objective et précise, en particulier pour

examiner les caractéristiques spatio-temporelles de la vergence chez ces sujets. Le deuxième objectif de cette étude était d'examiner si après rééducation orthoptique de la vergence, la performance des mouvements oculaires s'améliorait et, le cas échéant d'essayer de faire des hypothèses sur les mécanismes responsables de cette amélioration. Avant la rééducation, la saccade était précise chez tous les sujets, mais la vergence, en particulier la convergence le long du plan médian et la convergence combinée avec une saccade, était anormalement hypométrique, et très lente à effectuer comparée à celle d'enfants normaux de même âge. Ces résultats suggèrent la présence d'un déficit au niveau cortical et sous-cortical des structures responsables de la préparation et de l'exécution des mouvements de vergence, en particulier de la convergence. Ainsi, un déficit de l'attention visuelle entraînerait une mauvaise localisation de la cible qui pourrait être à l'origine des mouvements de convergence imprécis. Après rééducation orthoptique de la vergence, non seulement les symptômes de vertiges et céphalées ont disparu, mais aussi les mouvements sont devenus plus précis et plus rapides à déclencher et à exécuter. Nous pensons que ces améliorations sont dues à un meilleur contrôle de l'attention grâce à l'entraînement orthoptique. Toutefois, après entraînement, la performance des mouvements de convergence le long du plan médian et de la convergence combinée avec une saccade restait anormale (importante hypométrie et lenteur du mouvement).

Sur le plan théorique, l'intérêt de cette étude est qu'elle apporte des preuves en faveur de l'idée qu'un déficit de vergence est lié à un déficit des structures corticales/sous-corticales responsables de l'exécution des mouvements de vergence. Cela contraste avec les concepts traditionnels considérant les troubles de la vergence comme un problème d'origine musculaire donc périphérique.

### 3.3.2. LATENCE DES SACCADÉS ET DE LA VERGENCE CHEZ UNE FILLE DE 14 ANS AVEC NYSTAGMUS CONGÉNITAL

Z. KAPOULA, H. LE BERTE, M.P. BUCCI, Q. YANG

Chez des sujets avec nystagmus manifeste-latente présent dès la naissance, l'intensité du nystagmus est souvent plus importante lorsqu'un œil est couvert. Dell'Osso et Daroff (1999) attribuent ceci à des difficultés au niveau cortical d'évaluer la référence égocentrique lorsque le sujet n'est plus en vision binoculaire. On pourrait donc penser que, chez les sujets avec nystagmus, la latence des mouvements oculaires en vision monoculaire serait plus longue que celle en vision binoculaire car la localisation des cibles dans l'espace 3D pourrait être plus difficile en vision monoculaire. Pour tester cette hypothèse, nous avons examiné la latence des mouvements oculaires en vision binoculaire et monoculaire chez une jeune fille (14 ans) ayant un nystagmus dès sa naissance. Nous avons observé que la latence de la saccade, de la vergence et des mouvements combinés était anormalement longue en vision binoculaire alors qu'en vision monoculaire, les valeurs de la latence étaient comparables à celles observées chez les sujets sains (sans troubles visuo-moteurs) d'âge similaire. Une explication de



ce résultat paradoxal est qu'en vision monoculaire l'activation plus importante du nystagmus faciliterait le déclenchement de la convergence (isolée ou combinée). Nos résultats vont à l'encontre de l'hypothèse de Dell'Osso et Daroff, et pointent les conséquences bénéfiques du nystagmus plus marqué en vision monoculaire sur le contrôle volontaire des mouvements des yeux en profondeur-vergence.

3.4 EFFET DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRÂNIENNE DU CORTEX PARIÉTAL POSTÉRIEUR DROIT SUR LA LATENCE DES MOUVEMENTS DE SACCADÉ ET DE VERGENCE  
Z. KAPOULA, Q. YANG, O. COUBARD (LPPA), G. DANYS (Université de Siauliai), O. ORSSAUD (Hôpital Européen Georges Pompidou)

La technique de stimulation magnétique transcrânienne (SMT) consiste en l'impulsion brève d'un champ magnétique traversant le crâne et interférant avec l'activité électrique neuronale. Sans danger pour le sujet humain et couramment employé comme outil diagnostique, la SMT possède une très bonne résolution temporelle et constitue un instrument idéal pour la recherche fondamentale. Appliquée sur une région corticale déterminée, elle réalise un dysfonctionnement ponctuel et réversible, ce qui lui confère une très bonne résolution cognitive. Dans une étude préliminaire (Kapoula *et al.* 2001), nous avons montré pour la première fois que la SMT appliquée sur le cortex pariétal postérieur (PPC) droit prolongeait la latence des mouvements de saccade mais aussi de vergence pure (convergence et divergence le long du plan médian). Plus récemment, nous avons observé que la SMT du PPC droit influençait également le déclenchement des mouvements combinés de saccade et de vergence. En effet, la SMT prolongeait significativement la latence de ces mouvements, sans modifier toutefois la relation étroite existant entre les composantes saccadique et de vergence. Ces résultats démontrent que le cortex pariétal postérieur droit est impliqué chez l'Homme dans le déclenchement des mouvements de saccade et de vergence, qu'ils soient réalisés seuls ou conjointement.

3.5. SUSCEPTIBILITÉ DE DÉCLENCHEMENT RÉFLEXE DES MOUVEMENTS OCULAIRES DE VERGENCE : ÉTUDES COMPORTEMENTALE ET STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRÂNIENNE

O. COUBARD, Z. KAPOULA ; en collaboration avec R. MURI (Université de Berne) et S. RIVAUD-PECHOUX (Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, Unité INSERM 289)

La saccade oculaire peut être déclenchée de façon volontaire pour diriger le regard vers un objet convoité, mais aussi de façon réflexe en réaction à un stimulus soudain visuel ou auditif. Le paradigme oculomoteur *gap* est connu pour favoriser l'émergence d'une population de saccades à latences courtes (80-120 ms) qualifiées d'*express*. La vergence oculaire (convergence, divergence), moins connue, est un mouvement plus volitionnel, coûteux en temps, fragile, sensible aux effets de la fatigue et à l'âge. Dans une étude comportementale, nous

avons étudié la possibilité pour les mouvements de vergence d'être déclenchée de façon réflexe à l'instar de la saccade. Pour les mouvements de vergence le long de l'axe médian, nous n'avons pas observé de latences express. En revanche, lorsque la vergence était combinée à une saccade (déplacement du regard en latéralité et en profondeur), il était possible d'observer de telles latences.

Le cortex préfrontal (CPF) est supposé inhiber les saccades réflexes par ses efférences directes vers le colliculus supérieur (CS). Müri *et al.* (1999) ont montré que la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) du CPF droit favorisait l'apparition de saccades express controlatérales, suggérant l'abolition transitoire par la SMT de l'activité inhibitrice du CPF sur le CS. Nous avons examiné l'effet de la SMT du CPF droit sur le déclenchement de la convergence. Nous n'avons observé aucun effet de la stimulation sur la latence de la convergence pure. Toutefois, la SMT du CPF droit a permis l'émergence de latences express lorsque la convergence était combinée à la saccade. Ces résultats comportementaux et physiologiques suggèrent que le mode de déclenchement express spécifique au système de saccade peut être transféré au système de vergence dans le cas des mouvements naturels que sont les mouvement combinés saccade-vergence.

### 3.6. SUBSTRAT CORTICAL DES MOUVEMENTS DES YEUX DANS L'ESPACE 3D-DIRECTION ET DISTANCE : ÉTUDES PAR MEG/EEG

A. TZELEPI, Z. KAPOULA ; en coopération avec le Centre Meg-Hôpital Salpêtrière

L'étude de l'activité corticale pendant la préparation des mouvements des yeux dans l'espace 3D s'est poursuivie cette année avec un intérêt particulier pour les saccades verticales et la distance. Une expérience a été menée au centre MEG/EEG de l'hôpital de la Salpêtrière. Son objectif était de comparer l'activité corticale associée à la préparation des saccades verticales versus saccades horizontales dans l'espace lointain et l'espace proche. L'activité corticale a été enregistrée au moyen de 152 capteurs MEG. Par ailleurs, un certain nombre d'expériences ont été réalisées utilisant simultanément les enregistrements MEG et EEG, afin de comparer les données MEG/EEG et d'établir un lien avec nos expériences précédentes en EEG. Nos résultats des études avec EEG seulement montrent un rapport avec une anisotropie de l'espace proche-lointain, ainsi qu'un degré d'interdépendance entre les mécanismes visuo-moteurs et différents réseaux corticaux d'attention dans l'espace visuel réel 3D. De plus, l'activité corticale EEG pendant la suppression des saccades et des mouvements de vergence a été étudiée. Nos résultats indiquent une prépondérance de l'activité dans l'hémisphère droit suggérant l'implication d'un réseau cortical basé sur l'hémisphère droit.

### 3.7. MOUVEMENTS OCULAIRES ET PERCEPTION DE LA PEINTURE

#### 3.7.1. LA PERCEPTION DU VISAGE ET L'INFLUENCE DE LA COMPOSITION DANS DES TABLEAUX DE PEINTURE

T.B. DOAN, Z. KAPOULA

Des travaux sur l'exploration oculomotrice de scènes naturelles (revue Henderson, Hollingworth, 1998) ont examiné l'impact visuel et sémantique sur la position et la durée de fixation du regard. Les résultats sur les positions de fixation indiquent que les sujets regardent plus intensément vers des zones riches en information. En revanche, les conclusions sur l'emplacement de toutes premières fixations et leurs durées, ainsi que sur la part des facteurs visuel et sémantique, ne concordent pas. Nous nous proposons d'approfondir l'étude de ces paramètres, en prenant comme élément sémantique le visage, et comme support d'observation des tableaux de peinture cubiste plus ou moins abstraits (La noce, Le réveil matin, Contraste des formes). Nous analysons le comportement oculomoteur, comparativement lors des cinq premières fixations et lors de l'exploration totale, dans différentes conditions de présentation des visages (tableau inversé entièrement, tableau inversé partiellement, tableau normal). Cette étude fait suite aux recherches menées l'an passé sur les tableaux de Fernand Léger et fait partie du mémoire de DEA de Sciences Cognitives de T.B. Doan.

#### 3.7.2. MÉMOIRE DES TABLEAUX DE PEINTURE NON-RÉALISTE

O. HERBER, Z. KAPOULA

Nous étudions la capacité de mémorisation de trois tableaux non réalistes, non figuratifs de Fernand Léger et l'exploration oculomotrice qu'ils engendrent (La noce, Le réveil matin, Contraste des formes). Nous comparons deux types de mémoires : à long terme (six mois) et à court terme (10 secondes). L'analyse est centrée sur les paramètres temporels et spatiaux de l'exploration ainsi que sur les rapports verbaux des sujets. Il semble que les sujets ne gardent en mémoire que les éléments sémantiquement forts des tableaux, et leur exploration oculomotrice est guidée par cette mémoire sémantique (DEA de Sciences Cognitives, 2002).

Dans d'autres études en cours, nous examinons la perception de la profondeur dans les œuvres d'art. Nous comparons des saccades vers des points situés dans un plan fronto-parallèle, avec des saccades identiques dans des œuvres d'art faisant l'illusion de la profondeur (tableaux de Escher et Cézanne). Notre étude porte sur la vergence et compare les résultats entre des sujets jeunes (20-25 ans) et des sujets plus âgés (65-85 ans). Notre objectif est de déterminer dans quel degré la motricité oculaire est déterminée par l'espace pictural 3D perçu, ou bien l'espace physique 2D et fronto-parallèle.

#### 4. PROCESSUS DE CONTRÔLE POUR LA COORDINATION VISUO-MOTRICE

##### 4.1. MODÈLES INTERNES POUR L'ANTICIPATION DU TEMPS D'IMPACT

J. McINTYRE, A. BERTHOZ, (LPPA), F. LACQUANITI et M. ZAGO  
(Institut Scientifique Santa Lucia, Rome), C. OMAN, A. LIU, L. YOUNG  
(Massachusetts Institute of Technology)

Lorsqu'on attrape un objet en chute libre, le cerveau réussit à faire une prédiction sur le temps que mettra la balle pour atteindre la main. La précision avec laquelle le SNC peut prévoir le moment de contact avec une balle en chute libre montre que l'accélération de la balle est bien prise en compte lors des calculs du temps avant contact (TC). Mais le système visuel est peu sensible aux accélérations des objets dans le champ visuel. Nous faisons l'hypothèse que l'intégration des informations visuelles est couplée aux informations gravitationnelles au sein d'un *modèle interne* permettant ainsi de mieux anticiper TC. Nous avons étudié ces modèles au sol et en microgravité avec une tâche de saisie d'une balle en phase balistique. Nous poursuivons ces expériences avec un dispositif de réalité virtuelle. Nous cherchons les indices cognitifs et sensoriels qui contribuent à la sélection et la mise en œuvre des modèles internes pour la coordination visuo-motrice.

##### 4.2. STRATÉGIES DE CONTRÔLE CINÉMATIQUE POUR L'INTERCEPTION

J. McINTYRE ; en coopération avec J.J. SLOTINE (Massachusetts Institute of Technology)

Pour réussir une tâche d'interception, on doit transporter la main au bon endroit et au bon moment afin d'attraper l'objet dans les meilleures conditions. On peut envisager deux stratégies : soit essayer d'*ajuster* la vitesse de la main en fonction de celle de l'objet (contrôle rétroactif), soit essayer de *prévoir* l'endroit où se trouvera l'objet à un moment donné et transporter directement la main à cet endroit (contrôle prédictif). Nous avons exploré la capacité des sujets humains à réaliser une tâche d'attraper un objet en chute libre et nous avons comparé le comportement chez l'homme avec des stratégies de contrôle formulées par des roboticiens.

##### 4.3. CONTRÔLE DE LA FORCE ET DE L'IMPÉDANCE

J. McINTYRE, J. DROULEZ (LPPA), D. TOFFIN (CTS)

Un grand nombre de tâches manuelles implique une force de contact entre la main et un objet dans l'environnement. Quelles sont les variables de contrôle utilisées par le SNC pour spécifier la direction et l'amplitude de ces forces ? Lors des séries d'expériences avec un manche à retour d'effort nous avons mis en évidence un « sens de l'effort » multi-dimensionnelle pour le contrôle des forces appliquées par la main.

## 5. DÉVELOPPEMENT ET PLASTICITÉ DE L'INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE SENSORIELLE CHEZ LES MAMMIFÈRES

C. MILLERET, N. ROCHEFORT, L. FOUBERT ; en collaboration avec U.T. EYSEL KISVARDAY, P. BUZAS (Institut für Physiologie, Université de Bochum, Allemagne), J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

Le cerveau des mammifères est composé de deux hémisphères. Bien qu'anatomiquement séparés, ceux-ci coopèrent l'un avec l'autre par l'intermédiaire de faisceaux de fibres qui constituent les commissures cérébrales. Parmi ces commissures, le corps calleux est la plus importante, tout au moins par le nombre de fibres qui la constitue (200 à 800 millions suivant les espèces). Bien que le rôle de cette commissure soit resté inconnu, il est maintenant bien établi qu'elle transporte des messages aussi divers que des messages visuels, limbiques, auditifs, somesthésiques et moteurs d'un hémisphère à l'autre. Par voie de conséquence, le corps calleux s'est révélé être impliqué dans des fonctions cognitives supérieures telles la perception sensorielle, l'apprentissage, la mémoire et la motricité.

En dépit de l'établissement de ces concepts importants, la connaissance du corps calleux et de son rôle dans les fonctions cognitives supérieures restent encore extrêmement incomplètes que ce soit au cours du développement ou chez l'adulte. Or, ces questions sont essentielles puisqu'elles posent directement le problème du rôle de l'intégration interhémisphérique dans l'élaboration des fonctions cognitives dans les conditions normales ; elles touchent également le problème du rôle de cette même intégration dans les processus de réorganisation et de compensation qui peuvent se développer dans les conditions pathologiques, conduisant à une restructuration des fonctions cognitives. Cette méconnaissance résulte du moins en partie de l'absence de données précises sur des aspects majeurs de l'intégration interhémisphérique des messages nerveux incluant ses caractéristiques dans les domaines spatiaux et temporels, la façon dont elles émergent avec l'âge ou sont modifiées après une pathologie. Certaines données importantes concernant ces aspects sont certes déjà disponibles dans la littérature, en particulier concernant le système visuel (Engel *et al.*, 1991 ; Innocenti *et al.*, 1994 ; Munk *et al.*, 1995 ; Nowak *et al.*, 1995 ; Olavarria, 1996 ; Schmidt *et al.*, 1997 ; Kiper *et al.*, 1999 ; Bosking *et al.*, 2000 ; Olavarria, 2001), mais elles sont incomplètes du fait de certaines limitations imposées par les approches techniques. Ceci résulte aussi du faible nombre de travaux faisant appel à la modélisation pour aborder ces questions (Innocenti *et al.*, 1994 ; Houzel & Milleret, 1999). Au cours de l'année qui vient de s'écouler, nous avons entrepris de contribuer à résoudre ce problème fondamental d'une part en combinant deux disciplines différentes, les « Neurosciences Intégratives » et les « Neurosciences Computationnelles » et, d'autre part, en faisant appel à des techniques innovantes. Nos études ont porté pour l'heure sur les cartes corticales calleuses visuelles

primaires de chaque hémisphère (A17 et 18) du chat adulte normal (groupe de référence).

A. CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE VISUELLE VIA LE CORPS CALLEUX PAR IMAGERIE OPTIQUE

N. ROCHEFORT, C. MILLERET ; en collaboration avec U.T. EYSEL, Z. KISVARDAY, P. BUZAS (Institut für Physiologie, Lehrstuhl Neurophysiologie, Bochum, Allemagne)

Les caractéristiques spatiales des cartes corticales calleuses visuelles primaires du chat adulte normal ont été étudiées *in vivo*, simultanément au niveau de chaque hémisphère (sous anesthésie et paralysie), en utilisant le système d'imagerie optique « ORA 2001 ». Ce système correspond à une technique innovante et sera implanté prochainement dans notre équipe sous la forme de l'imager « 3001/D », capable de fournir des données très précises à la fois dans les domaines spatiaux et temporeux (100  $\mu\text{m}$  ; < 1 ms). En utilisant des stimuli visuels appropriés (générés par ordinateur), les limites, l'organisation rétinotopique et les propriétés spatiales de ces cartes corticales calleuses ont été établies. La distribution des différents domaines fonctionnels les uns par rapport aux autres (sélectivité d'orientation, dominance oculaire, fréquences spatiales et sensibilité au mouvement) au niveau de ces cartes calleuses nous est donc maintenant connue, tant dans la zone efférente que la zone de terminaisons. Ces données « spatiales » correspondant aux bases neurales de la perception des différents attributs des objets présents dans notre espace visuel, devraient permettre à terme de mieux comprendre comment le corps calleux participe à la perception visuelle chez les mammifères supérieurs.

B. CARACTÉRISATION TEMPORELLE DE L'INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE VISUELLE VIA LE CORPS CALLEUX PAR COMPUTATION (LOGICIEL « NEURON »)

L. FOUBERT, C. MILLERET ; en collaboration avec J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

Cette étude vise à prédire, par une approche computationnelle, si le rôle du corps calleux dans les processus de « liage » perceptif peut être modifié par rapport à la normale dans des conditions pathologiques de vision. Concrètement, elle a consisté à étudier si une modification de la géométrie des axones calleux, résultant d'une altération précoce de la vision (occlusion monoculaire), peut modifier leur *profil temporel* d'activation jusqu'aux boutons terminaux par rapport à la normale. Simulant la propagation d'un potentiel d'action à l'aide du logiciel *Maxsim* dans des axones calleux (marqués à la biocytine) de *chats adultes normaux*, reconstruits en 3D à l'aide du système NeuroLucida, Innocenti et ses collaborateurs (Innocenti *et al.*, 1994 ; Tettoni *et al.*, 1996) avaient déjà montré que tous les boutons synaptiques d'une arborisation terminale donnée s'activaient de façon synchrone, quelle que soit la morphologie de l'axone. Utilisant un autre logiciel de simulation (plus performant que le précédent), à savoir *Neuron*, nous

avons d'abord confirmé ces résultats chez les adultes normaux. Nous avons en outre démontré qu'une *occlusion monoculaire précoce* ne modifiait pas cette synchronie à l'âge adulte, malgré de fortes anomalies dans la morphologie des axones calleux liées à l'occlusion (cf. Milleret *et al.*, en préparation). D'après ces résultats, il semble donc que la géométrie des axones calleux n'altère en rien les capacités du corps calleux à fournir au cortex visuel des activations corrélées dans le temps. Cette altération de la géométrie axonale ne semble par conséquent pas en mesure d'altérer les processus de « liage » perceptif.

## 6. PERCEPTION ACTIVE ET MANIPULATION D'OBJETS

### 6.1. VISION TRIDIMENSIONNELLE

J. DROULEZ, M. WEXLER, A.L. PARADIS, J. VAN BOXTEL, M. VALLET

Nous poursuivons notre étude quantitative des principaux indices visuels permettant la perception des caractéristiques 3D des objets. Après le mouvement, la disparité binoculaire et la disparité de mouvement, nous avons étudié le rôle de la perspective linéaire et des textures d'éclairage (« bump-mapping ») en présentant aux sujets des stimuli conflictuels dans lesquels deux indices conduisent à des interprétations tri-dimensionnelles différentes. Nous avons également évalué la robustesse des principales méthodes d'extraction et de traitement du flux optique, et nous avons comparé les résultats des simulations aux données expérimentales obtenues dans une tâche de perception de l'orientation des surfaces planes en mouvement. Le mouvement est connu pour permettre à lui seul de séparer un flux d'informations visuelles en objets indépendants (formation de contours virtuels cinétiques, mouvements en transparence). Nous avons montré que cette capacité de segmentation s'étend aux mouvements tri-dimensionnels. Cette segmentation cinétique de scènes 3D répond aux capacités d'intégration et de résolution du problème d'ouverture pour des mouvements cohérents tri-dimensionnels. L'utilisation de l'IRM fonctionnelle (en collaboration avec le SHFJ d'Orsay) nous a permis de mettre en évidence le réseau cortical impliqué dans la perception du mouvement et des formes 3D. Une étude actuellement en cours, en collaboration avec le SHFJ, l'INRIA et le centre MEG, permettra d'analyser plus précisément la séquence d'événements temporels conduisant à l'émergence d'une perception 3D à partir du mouvement. En outre, le protocole expérimental que nous avons développé a fourni un ensemble de données qui permettra d'analyser les possibilités offertes par la fusion des différentes techniques d'imagerie fonctionnelle.

### 6.2. VISION ACTIVE ET INTERACTIONS MULTIMODALES

J. DROULEZ, M. WEXLER, C. MORVAN

Dans une situation de perception active, lorsque le sujet est lui-même en mouvement, il dispose en plus du flux optique d'informations d'origines diverses (vestibulaires, proprioceptives, copies efférentes des commandes motrices) qui

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 tri dimensionnelles stationnaires par rapport à un référentiel allocentré. Un dispositif de manipulation à retour d'effort programmable nous a permis de commencer l'étude psychophysique de la perception des forces : quelle est la capacité de discrimination en direction et en amplitude de la force ? Quelle différence y a-t-il entre percevoir et reproduire une force ? Ces recherches n'ont pas seulement un intérêt fondamental dans la compréhension de la perception haptique. Les données obtenues par les études en cours sont également indispensables pour la mise au point des dispositifs, de plus en plus nombreux, à l'interface entre l'action de l'opérateur et le système dynamique complexe qu'il doit contrôler. C'est en particulier le cas dans la conduite automobile, où les interfaces commandes (volant, frein, boîte de vitesse) sont de plus en plus assistées voire remplacées par des dispositifs électroniques programmables.

### 6.3. VISION ARTIFICIELLE ET APPROCHE ROBOTIQUE

J. DROULEZ, F. DAVESNES, J. LAURENS

Dans le cadre de contrats de recherche avec EDF, nous avons étudié les performances d'algorithmes de modélisation automatique et de mise en correspondance dans le temps entre ensembles de données 2D (images et séquences vidéo) et données 3D issues de capteurs laser. Ces algorithmes sont fondés sur l'extraction de primitives de type contour, généralisées à des espaces de dimension supérieur à 2. Nous sommes également partie prenante dans un programme européen (BIBA) dont l'objectif est de montrer l'intérêt de l'approche probabiliste bayésienne à la fois dans la programmation et l'apprentissage d'artefacts et dans la modélisation micro- et macroscopique de comportements sensori-moteurs. Notre équipe s'intéresse plus particulièrement à l'implémentation de l'inférence bayésienne par des réseaux de neurones biologiquement plausibles et à la modélisation des interactions multi-sensorielles (fusion d'informations) par des réseaux bayésiens auto-adaptatifs

### 6.4. ÉTUDE DES BASES NEURALES DE LA PERCEPTION DE SURFACES TRIDIMENSIONNELLES EN MOUVEMENT PAR IMAGERIE MULTI-MODALE

A-L. PARADIS, J. DROULEZ ; en collaboration avec J.-B. POLINE (SHFJ-CEA, Orsay) ; L. GARNERO (UPR640-CNRS, Paris), D. SCHWARTZ (Centre MEG, Paris), O. FAUGERAS (INRIA, Sophia-Antipolis)

Il s'agit de mieux comprendre comment le système visuel analyse le mouvement rétinien et utilise cette information dans la perception des objets tridimensionnels.



Deux études réalisées précédemment en IRM fonctionnelle nous ont permis de localiser un réseau d'aires corticales impliquées dans la perception de la structure et du mouvement 3D d'objets définis à partir de la seule parallaxe de mouvement. Nous souhaitons maintenant déterminer la dynamique du traitement cortical lié à la reconstruction d'un objet 3D à partir d'indices de mouvement visuel. Après une étude préliminaire en Magnéto-encéphalographie (MEG), nous avons mis au point un protocole répondant à la fois aux contraintes de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) et de l'électrophysiologie humaine (MEG et EEG) afin de rendre comparable les enregistrements effectués dans les différentes modalités. La séquence de stimulation visuelle consiste en une distribution aléatoire de points statiques se mettant en mouvement. Le mouvement peut être cohérent de telle sorte qu'il évoque au sujet une structure 3D sous-jacente (condition 3D) ou incohérent (condition 2D). Nous avons réalisés des enregistrements MEG-EEG simultanés, et IRMf chez une douzaine de sujets. Il s'agit maintenant de caractériser l'activité évoquée par l'apparition d'un objet visuel en mouvement et de la comparer avec celle induite par le mouvement incohérent. À terme, nous comptons sur la fusion des différentes modalités (MEG-EEG et IRM) pour déterminer le réseau cortical impliqué dans la reconstruction 3D et sa dynamique.

#### 6.5. PERCEPTION ET ATTRIBUTION DE PROPRIÉTÉS AUX OBJETS

N. BULLOT, J. DROULEZ

Durant l'année 2002-2003, Nicolas Bullot a bénéficié d'une bourse Fulbright pour être visiteur (*visiting fellow*) au Centre de Sciences Cognitives de l'Université de Rutgers (Rutgers Center for Cognitive Science, ou RuCCS), dans le New Jersey, au USA. Le projet a consisté à mettre en place une collaboration entre deux institutions françaises — l'équipe Droulez du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA) du Collège de France et l'Institut Jean Nicod (EHESS/ENS/CNRS) et l'équipe du Dr. Zenon Pylyshyn impliquant des recherches conceptuelles et expérimentales sur la cognition située et les capacités de référence perceptive aux objets physiques. Dans un domaine grandissant des sciences cognitives, on fait référence à de telles capacités en parlant de référence déictique, démonstrative ou indexicale. Leur étude occupe une place centrale pour comprendre comment la pensée et les capacités cognitives sont « ancrées » sur des objets et des situations du monde, par l'intermédiaire des capacités sensorielles et motrices. En d'autres termes, leur étude est fondamentale pour comprendre comment les capacités sensorielles et motrices contribuent à la connaissance que nous avons des constituants du monde.

#### 6.6. PROJET BIBA : BAYESIAN INSPIRED BRAIN AND ARTEFACTS

J. DROULEZ, F. DAVESNE, J. LAURENS, V. WEINER

Le projet européen BIBA (Bayesian Inspired Brain and Artefacts, IST-2001-32115) se déroule en collaboration avec le laboratoire GRAVIR (IMAG-INRIA),

l'équipe GATSBY (University College of London), l'Autonomous System Lab (EPFL, Suisse), le Nonlinear System Laboratory (MIT, USA). Il est organisé autour de trois axes : bases neuronales de l'inférence probabiliste, le développement de modèles probabilistes de la boucle perception-action permettant de comprendre la gestion de l'incertitude par le CNS et la variabilité des réponses psychophysiques, et leur application en robotique mobile. Dans ce cadre nous utilisons deux robots dotés de multiples capteurs constituant des bases d'expérimentations.

Notre objectif au sein de ce projet est la modélisation du système de perception du mouvement propre et du système oculomoteur. Nous avons réalisé un modèle d'intégration des informations vestibulaires réalisant la fusion canaux-otolithes et utilisant des contraintes probabilistes sur la vitesse qui reproduit les résultats des principaux paradigmes psychophysiques dans ce domaine. Nous avons également mis en place un algorithme bayésien de calcul du flux optique et un modèle d'interaction visuo-vestibulaire. Enfin, nous avons réalisé un système unissant une perception egocentrée de la structure locale de l'environnement et les informations de mouvement propre à un modèle de l'environnement construit simultanément.

## 7. IMMERSION ET COUPLAGE PERCEPTION-ACTION EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

(dans le cadre d'une coopération LPPA/CTS-Renault)

L'utilisation des techniques de Réalité Virtuelle (RV) est de plus en plus répandue aussi bien pour les études scientifiques que pour les applications industrielles. Au-delà de l'utilisation de ces dispositifs comme moyens de manipulation, la notion de *immersion* ou de *présence* s'avère centrale, en particulier celle du corps propre de l'utilisateur dans la réalité (spatio-temporelle) simulée. La perception de cette réalité par un sujet manipulant des objets virtuels est fonction de la qualité de la restitution des *stimuli visuels* et de *l'intégration des actions* du sujet au sens de Gibson. Pour les prendre en compte, au-delà de la visualisation du corps propre du sujet, son immersion doit être effectuée, notamment par la génération des stimuli haptiques et kinesthésiques. Cette notion d'immersion, a été étudiée suivant une méthodologie scientifique rigoureuse, sur simulateur de conduite et en salle de réalité virtuelle avec visualisation stéréoscopique.

### 7.1. INTÉGRATION SENSI-MOTRICE DANS UN SIMULATEUR DE CONDUITE : CONTRIBUTION DE LA RESTITUTION DU MOUVEMENT À LA RÉALISATION DES TACHES ÉLÉMENTAIRES DE CONDUITE

F. PANERAI, A. KEMENY (CTS), J. DROULEZ, A. BERTHOZ (LPPA)

Dans le cadre du projet européen ULTIMATE (Eureka n° 1493) une coopération de recherche est menée avec des partenaires industriels et académiques pour

étudier et concevoir un simulateur de conduite avancé à des fins de recherche et développements (Kemeny, A. 2001). Ce simulateur sera équipé d'un casque de réalité virtuelle à large champ de vision, à haute résolution et à temps de réponse effectif réduit (Coates, N. *et al.*, 2002), d'une plate-forme mobile à six axes, ainsi que deux rails orthogonaux pour rendre de manière efficace les accélérations longitudinales et latérales. Le LPPA a pour mission de mener l'étude et l'évaluation scientifique de l'intégration visuo-vestibulaire et proprioceptive à travers des protocoles expérimentaux (Siegler I., *et al.*, 2001). Une première étude vise à tester l'hypothèse que la parallaxe visuelle combinée avec le mouvement propre du conducteur contribue à l'amélioration de la perception de la profondeur, et donc à l'exécution de tâches élémentaires en conduite simulée.

#### 7.2. PERCEPTION DE LA DISTANCE

F. PANERAI, A. KEMENY (CTS), J. DROULEZ (LPPA)

Dans le cadre d'un projet PREDIT, une coopération de recherche a été menée en double objectif. D'une part la validation du point de vue de la perception humaine des moyens de simulation de conduite, d'autre part, l'approfondissement de la connaissance des facteurs humains impliqués dans l'utilisation de ces environnements virtuels multi-sensoriels. L'étude a été focalisée sur la perception de la distance de sécurité ainsi que de la vitesse subjective. Une série d'expériences a été menée pour déterminer l'influence d'un nombre prédéfinis de paramètres optiques géométriques et kinesthésiques sur le comportement de conduite. Par exemple, nous nous sommes intéressés aux conséquences, d'un changement de la hauteur simulée, ainsi que de l'absence de la restitution kinesthésique (Panerai *et al.*, 2001, Panerai *et al.*, 2002). Entre autre, cette étude a permis aussi d'effectuer une révision critique de la littérature scientifique portant sur les aspects de perception humaine en conduite simulée (Kemeny *et al.*, 2002).

#### 7.3. CONTRIBUTION DU RETOUR D'EFFORT AU CONTRÔLE SENSI-MOTEUR ET À L'APPRENTISSAGE DE MODÈLE INTERNE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES

D. TOFFIN, A. KEMENY (CTS), J. DROULEZ, J. MCINTYRE (LPPA)

Dans une première étude nous avons évalué la capacité de l'homme à percevoir et à reproduire des forces appliquées sur la main. Pour cela, nous avons testé à travers deux tâches, l'existence de distorsions perceptives mais également l'existence de directions privilégiées (Toffin *et al.*, 2003). Les sujets devaient résister à une force de référence appliquée sur la main par un joystick à retour d'effort (Robotop) dans une direction donnée avec comme instructions de garder la main dans une position constante. Dans la première tâche de perception, les sujets devaient ensuite percevoir et résister à une seconde force dont ils pouvaient modifier la direction en utilisant le potentiomètre du dispositif. La tâche était ici de réorienter cette seconde force pour qu'elle soit dans la même direction que la force initiale de référence. Dans la seconde tâche de reproduction, les sujets

avaient comme instruction de pousser contre le joystick, qui était devenu rigide, dans la direction de la force qu'ils avaient du appliquer pour s'opposer à la force initiale de référence initialement perçue. Dans cette expérimentation nous observons une distorsion systématique dans la tâche de reproduction active de la force, mais cette distorsion n'était pas présente dans tâche de perception. Nous montrons également que ces distorsions peuvent être prédites par l'anisotropie de la raideur du bras et qu'elles peuvent être affectées par la modification de l'impédance mécanique du système bras-joystick. Ces résultats montrent que les sujets ne se représentent pas une force appliquée sur la main en terme de perception d'un vecteur force mais plutôt en terme d'activité motrice pour résister ou reproduire cette force.

Dans une deuxième expérience, nous avons essayé de mettre en évidence la stratégie utilisée par les sujets lors de transferts d'information entre la modalité haptique et la modalité visuelle. En effet dans cette expérimentation, les sujets devaient dans un cas reproduire visuellement la direction d'une force perçue au travers d'un joystick à retour d'effort (Robotop) et dans un deuxième cas, ils devaient reproduire activement la direction de la force perçue par l'orientation d'un trait lumineux. Les résultats obtenus dans trois configurations différentes ont permis de montrer que le sujet se construisait une forte correspondance entre les deux modalités (haptique et visuelle) lui permettant de reproduire, dans chacune de ses modalités sensorielles, les directions perçues. Par contre, l'analyse de la distorsion entre le stimulus et la réponse des sujets ne permet pas d'affirmer que les sujets utilisent un changement de coordonnées entre les repères visuel et haptique, mais au contraire, les résultats sont compatibles avec un transfert direct des directions dans le référentiel du stimulus vers les directions dans le référentiel de la réponse.

#### 7.4. INTERACTIONS ENTRE LES INDICES VISIO-VESTIBULAIRES LORS DE LA PERCEPTION DES DISTANCES EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

D. PAILLE, A. KEMENY (CTS), A. BERTHOZ (LPPA)

Pour effectuer une tâche d'estimation des distances égocentriques, le cerveau intègre un grand nombre d'informations visuelles telles que : disparités géométriques entre les deux projections rétiniennes, accommodation et convergence, perspective linéaire, parallaxe de mouvement, occlusions, hauteur dans le champ visuel, gradient de texture ou encore champ de vision. L'expérience montre que la perception des distances pour un observateur statique ou dynamique est perturbée lors de l'observation d'une scène virtuelle. En effet, dans la reconstruction de l'espace, lorsque ces indices entrent en conflit avec la disparité, l'observateur perçoit des « erreurs » dans l'espace virtuel qui influencent, entre autre, la perception des distances. Dans ce cadre nous avons effectué une première expérimentation visant à établir si l'ouverture du champ visuel *frontal* (30° à 90°) pouvait avoir une influence sur la perception de la distance dans un environnement virtuel texturé observé à l'aide d'un système de projection stéréoscopique sur grand

écran. Pour cela nous avons demandé à nos sujets d'effectuer une « estimation verbale » de la distance les séparants d'un objet test. Des études menées en environnements virtuels font état d'une perception modifiée des distances et des tailles d'objets par rapport aux valeurs réelles. En effet, l'observation d'une image virtuelle est similaire à l'observation d'une scène à travers une fenêtre et il est possible que la partie manquante de l'espace puisse fournir des indices supplémentaires pour une tâche d'estimation des distances. Nos premiers résultats montrent que la taille du champ visuel *frontal* n'influe pas sur la perception de la distance égocentrique. Par contre nous avons observé une surestimation des distances éloignées et une sous estimation des distances proches par rapport à la distance simulée ; un résultat qui a déjà été montré par ailleurs en environnement réel dans la littérature.

Dans une deuxième expérimentation, nous allons nous attacher à étendre cette étude à des champ de vision plus large (90° à 150°) grâce à l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle développé dans le cadre du projet CARDS à travers une coopération entre le LPPA et des partenaires industriels (notamment RENAULT et SEOS fournisseur du casque). Pour cela l'estimation de la distance perçue ne sera plus verbale mais consistera en une reproduction active de la distance à estimer dans le but de diminuer les différences interindividuelles. Afin de mieux comprendre ces « illusions perceptives », les interactions entre les différents indices visuels de perception des distances seront étudiées plus précisément pour déterminer les rôles respectifs de la parallaxe, la vision binoculaire en fonction de la taille du champ de vision.

#### 7.5. VISION DES OBJETS VIRTUELS TRI-DIMENSIONNELS TEXTURES EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

M. VALLET, A. KEMENY (CTS), J. DROULEZ (LPPA)

Les propriétés de surface des objets virtuels sont couramment modélisées à l'aide d'une ou de plusieurs textures. Il s'agit d'ensembles de données bidimensionnelles qui, une fois appliquées sur une surface, fournissent des informations locales utilisées pour calculer la couleur de l'objet en chaque point. Le caractère répétitif des motifs présents dans les textures associé aux distorsions géométriques de leur projection sur chaque rétine fournit de précieuses indications sur la forme de l'objet texturé. L'étude de cet indice de perception du relief, appelé *gradient de texture*, est à la base de notre travail : l'utilisation de textures dans une scène virtuelle modifie notre perception de cet environnement. Il importe de comprendre les mécanismes qui sous-tendent la vision d'objets virtuels texturés afin d'adapter l'usage des textures à une meilleure perception d'un environnement virtuel. Au cours de notre étude, nous avons mis à profit la technique de perturbation des normales par le biais d'une texture pour mettre en évidence un nouvel indice de perception du relief (Vallet *et al.*, 2003b). En effet, la présence de rugosités à la surface d'un objet peut être simulée grâce à l'interaction de ce type de texture avec le modèle de propagation de la lumière utilisé lors du rendu

de la scène (*bump-mapping*). Or l'ombrage qui résulte de l'aspect rugueux de l'objet dépend de l'orientation locale de la surface sous-jacente et l'évolution des distributions locales de luminance au niveau de chaque aspérité est perçue comme une indication sur la forme globale de l'objet texturé.

Par la suite, nous avons utilisé une technique similaire pour simuler la présence de particules réfléchissantes orientées aléatoirement dans l'espace à la surface d'un objet (Vallet *et al.*, 2003a). Des effets de scintillement correspondant à l'apparence de matériaux spécifiques tels que la peinture métallisée, le granite ou l'eau peuvent ainsi être créés. Par ailleurs, cette méthode permet d'obtenir un percept de scintillement provoqué à la fois par les variations temporelles de luminance des particules, mais aussi, et simultanément, par des disparités binoculaires de luminance. Ces résultats forment la première étape d'une étude de synthèse sur la perception des matériaux en environnement virtuel et sur l'apport de chaque composante simulée de l'apparence visuelle à la perception des objets texturés.

## 8. SÉLECTION DES ENTRÉES IDIOTHÉTIQUES ET TEMPORELLES DANS LA NAVIGATION SPATIALE

### EFFET DU TEMPS ET DU CADRE DE RÉFÉRENCE SUR L'ESTIMATION D'UNE ROTATION DU CORPS

I. ISRAËL, C. LECOQ

L'orientation spatiale repose sur la mémoire du déplacement (codage égo-centré) et/ou des repères externes (codage exocentré). Nous avons voulu étudier l'effet du temps sur ces deux types de codage. Les sujets, assis sur un fauteuil rotatoire motorisé, regardent d'abord l'environnement, puis sont passivement pivotés dans le noir. Après la rotation imposée, et après un délai de 10 ou 25 s., les sujets doivent soit retourner à leur point de départ, soit reproduire la rotation imposée, en pilotant le fauteuil à l'aide d'un joystick. Dans une première analyse, nous avons comparé le gain (réponse/stimulus) des angles parcourus, pour 6 sujets en condition « retour » et 6 sujets en condition « repro ». Le gain était plus faible (de 1,2 % en retour et 3,0 % en repro) avec le délai long qu'avec le délai court. Le gain en repro était plus proche de l'unité et plus élevé que le gain en retour, et la variabilité était plus élevée en retour. Mais en retour, 2 sujets étaient retournés au point de départ en répétant le trajet imposé à l'envers (codage égo-centré), et 4 sujets avaient complété la rotation imposée jusqu'à être à nouveau parvenus au point de départ (codage exocentré). Nous avons donc séparé ces sujets, et trouvé que pour les sujets égo-centrés le gain (réponse effectuée/réponse attendue) était de 1.00 avec le délai court et plus bas de 6 % avec le délai long, alors que pour les sujets exocentrés le gain était plus bas, la variabilité plus élevée, mais la différence entre les deux délais de seulement 0,6 %. Ce n'est donc pas la tâche (repro vs retour) qui détermine le codage utilisé, mais plutôt la stratégie employée (inversion vs complétion). Si nous laissons les sujets

choisir le codage de la tâche retour, nous obtiendrons des résultats sur la préférence individuelle, et connaissons l'effet du temps sur les mouvements naturellement codés de façon ego — et exocentrée.

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

### 9.1. DYNAMIQUES RAPIDES DE LA MISE À JOUR DES RÉPONSES DIRECTIONNELLES M.B. ZUGARO, A. ARLEO, A. BERTHOZ, S.I. WIENER

Le but de cette étude était d'établir la latence des réponses des neurones de direction au niveau du thalamus antérodorsal. Dans une phase initiale, on établit la courbe de réponse des neurones pendant les déplacements libres du rat. Puis, pour le reste de l'expérience, le rat assoiffé reste immobile, orienté dans la direction préférée du neurone, au centre de l'arène et reçoit des gouttes d'eau chaque 0,5 seconde dans un petit réservoir. Les lumières sont éteintes (la cellule continue à décharger), et le repère principal (une carte contrastée affichée au mur) est déplacé. La lumière rallumée, on mesure le délai de suppression d'activité du neurone (car le rat n'est plus orienté dans la direction préférée par rapport à la carte). On éteint encore les lumières, on remet la carte dans la position initiale, on rallume les lumières. Puis on mesure le délai pour la réactivation de la cellule, qui était de 80 msec. Ce processus de mise à jour très bref indique que les signaux visuels arrivent par des voies plutôt direct vers le thalamus antérodorsal. Selon les modèles de réseaux d'attracteurs continus, ce processus peut être réalisé avec l'activation en chaîne de tous les neurones les uns après les autres en passant par toutes les directions préférées intermédiaires, ou avec un saut activation d'un groupe de neurones de même direction préférée initiale directement au groupe de neurones de direction préférée actuelle. Nos résultats favorisent l'hypothèse d'un saut d'activation.

### 9.2. CONSÉQUENCES D'UNE INACTIVATION GÉNÉTIQUE SUR LES PROCESSUS NEURAU X DE LA NAVIGATION : UTILISATION DE SOURIS KNOCK-OUT ET TRANSGÉNIQUES CONDITIONNELLES

L. RONDI-REIG, E. BURGUIÈRE, G. PETIT ; en collaboration avec les  
Pr TONEGAWA (University of MIT), MARIANI (Université Paris VI), DE ZEEUW  
(Université de Rotterdam)

Ce projet se situe dans le cadre des études sur la mémoire spatiale. Dans ce contexte, nous nous intéressons aussi bien aux capacités à former et mémoriser une représentation mentale de l'environnement qu'aux capacités à utiliser cette représentation pour se rendre à un endroit. Nous désignerons l'ensemble de ces processus sous le terme d'orientation spatiale et le comportement adopté par l'animal pour se rendre d'un endroit à un autre sous le terme de stratégie. Nous souhaitons étudier trois types de stratégie d'orientation spatiale : la stratégie

allocentrique, égocentrique et de guidage. Le type de stratégie utilisée dépend des processus cognitifs utilisés, c'est-à-dire dans notre cas des différents éléments sensoriels intégrés. Ce projet est centré sur une approche génétique du comportement de la souris (souris transgéniques conditionnelles). Les souris transgéniques qui nous intéressent possèdent une modification d'origine génétique des mécanismes de plasticité synaptique au niveau du cervelet ou de l'hippocampe. Le but de l'analyse comportementale est de caractériser les ou la stratégie d'orientation spatiale qui sont/est plus spécifiquement atteinte(s) chez ces souris. Dans ce but, j'ai mis au point un nouveau test qui permet de dissocier les trois stratégies d'orientation spatiale qui nous intéressent. Il s'agit d'un labyrinthe aquatique ayant la forme d'une étoile, le « starmaze ». Les tests comportementaux développés pour ce projet (notamment le « starmaze ») ont été spécifiquement choisis pour disséquer de manière très fine les processus cognitifs impliqués dans l'orientation spatiale. L'étude comportementale des deux modèles de souris transgéniques que nous avons à notre disposition a permis de mettre en évidence trois points importants : Dans les deux cas, nous avons corrélié l'absence des mécanismes de plasticité synaptique avec un déficit d'orientation spatiale. Chez les souris possédant une inactivation génique au niveau du cervelet (PKCI transgéniques), nous avons mis en évidence un retard d'apprentissage dans une tâche d'orientation spatiale. Ce retard pourrait être dû à un manque de précision dans la recherche d'un lieu. Nous souhaitons continuer à caractériser ce déficit en testant l'hypothèse que l'absence de LTD au niveau des cellules de Purkinje des souris PKCI pourrait entraîner des déficits dans l'évaluation de certaines mesures géométriques comme notamment l'évaluation des distances et/ou les mesures d'angle apparent. De manière intéressante, les stratégies déficitaires dépendent du type de mécanisme altéré. En effet, les animaux possédant une inactivation génétique au niveau de l'hippocampe (souris NR1 « knock-out ») apparaissent déficitaires pour les stratégies allocentrique et de guidage (Rondi-Reig *et al.*, FENS Abstr., vol. 1, A209.5, 2002). Au contraire, les animaux possédant une inactivation génique au niveau du cervelet (PKCI transgéniques) sont tout à fait capables d'utiliser la stratégie allocentrique mais semblent déficitaires pour la stratégie égocentrique (résultats en cours d'analyse). Dans les deux cas, les résultats obtenus montrent que même si une altération des mécanismes de plasticité synaptique étudiés ici entraîne des déficits d'orientation spatiale, il existe des possibilités de compensation comportementale. En effet, dans les deux modèles étudiés, les animaux présentent un retard d'apprentissage par rapport aux animaux témoins mais un entraînement supplémentaire leur permet finalement de réussir la tâche en utilisant une stratégie comportementale alternative. Dans tous les cas, il est important de souligner que seule une partie du registre comportemental permettant de s'orienter dans l'espace est atteint chez les animaux transgéniques.



## 10. MÉMOIRE SPATIALE ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT

### 10.1. L'INFLUENCE D'UN CONFLIT SENSORIMOTEUR « DISTRACTEUR » SUR LA MÉMORISATION DES TRAJETS EN SITUATION DE CONFLIT

P. PANAGIOTAKI, S. LAMBREY, A. BERTHOZ

Dans la présente étude, notre hypothèse est que, au cours d'une navigation dans un environnement virtuel, les sujets seraient capables de mémoriser la trajectoire d'un couloir virtuel (couloir expérimental) en fonction du conflit introduit pendant la navigation et non en fonction d'un conflit introduit lors de la navigation dans un autre couloir (couloir « distracteur »). Pendant l'expérience, les sujets devaient naviguer de manière semi-active dans des couloirs virtuels tout en mémorisant leur trajet. Ensuite, les sujets naviguaient dans un couloir « distracteur » sans le mémoriser. Deux gains<sup>1</sup> de conflit sensoriel étaient introduits aléatoirement entre des informations visuelles et non visuelles pendant la navigation dans chaque couloir. Finalement, les sujets devaient reproduire le trajet mémorisé avec les yeux fermés. À la fin de l'expérience, il était demandé à chaque sujet « s'il avait trouvé quelque chose d'inhabituel » durant la navigation. Selon les réponses, les sujets étaient classés en trois groupes ; groupe 1 (aucune prise de conscience du conflit) ; groupe 2 (ils ont entièrement compris le conflit sensoriel) ; et groupe 3 (ils ont senti « quelque chose de bizarre », mais ne pouvaient pas le caractériser). Les résultats indiquent que la prise de conscience du conflit influençait significativement la reproduction du trajet mémorisé ; les sujets du groupe 1 et du groupe 2 produisaient significativement moins d'erreurs que les sujets du groupe 3. De plus, les résultats montrent que pour les premiers deux groupes la reproduction de la trajectoire n'était pas influencée par le conflit sensoriel non associé avec la navigation ni son encodage ; cependant, pour le groupe 3 la reproduction du trajet était influencée par le conflit sensoriel associé au couloir « distracteur ». Ces résultats suggèrent l'existence d'une sélection d'informations sensorielles stockées dans la mémoire spatiale concernant la reproduction des trajets ; mais fournissent, en même temps, des indices sur le rôle important des mécanismes cognitifs de la conscience à la gestion du conflit sensoriel.

### 10.2. INFLUENCE D'UN CONFLIT SENSORIEL SUR LA MÉMORISATION D'UN TRAJET PARCOURU EN RÉALITÉ VIRTUELLE

S. LAMBREY, P. PANAGIOTAKI, A. BERTHOZ

Le guidage de la navigation exige que le cerveau puisse réaliser une intégration multisensorielle et construire une perception cohérente des relations entre le corps et l'espace à partir des informations données par les capteurs visuels, proprioceptifs et vestibulaires. Afin d'étudier le rôle respectif de ces différentes informations dans la mémoire des trajets, nous utilisons un paradigme de navigation en réalité

---

1. Note à venir.

virtuelle dans lequel les sujets doivent mémoriser puis reproduire un trajet. Le dispositif expérimental permet de créer artificiellement un conflit sensoriel entre les informations visuelles et non-visuelles lors des rotations actives du corps entier. Lorsque les sujets arrivent au niveau d'un virage dans le couloir virtuel, ils doivent tourner leur corps d'un angle soit supérieur à l'angle virtuel, soit inférieur, en fonction du type de conflit généré. Dans une étude utilisant ce paradigme (1, 2), nous avons suggéré que l'utilisation des informations conflictuelles pour réaliser la tâche demandée dépend de l'individu, certains sujets utilisant préférentiellement les informations visuelles tandis que d'autres se basent essentiellement sur les informations non-visuelles. En outre, la prise de conscience de l'existence du conflit sensoriel semble renforcer la différence entre ces deux types de sujets. Dans une autre étude (3), nous avons montré que la reproduction d'un trajet est influencée par le conflit sensoriel existant pendant la navigation le long de ce trajet, mais pas par le conflit existant pendant la navigation le long d'un trajet distracteur, parcouru juste avant la reproduction.

### 10.3. ADAPTATION AUX CONFLITS SENSORIMOTEURS EN RÉALITÉ VIRTUELLE.

#### RÔLE DU RETOUR MOTEUR

##### I. DUMONTHEIL, A. BERTHOZ

Dans des conditions naturelles, il existe parfois des situations où les informations sensorielles apportées par différents systèmes sont en conflit, c'est le cas notamment lorsque les gens ressentent le mal de mer. Ces situations peuvent être reproduites expérimentalement. L'étude des réarrangements sensoriels permet alors d'aborder l'intégration sensorielle et les phénomènes d'adaptation. Lors de la navigation, des informations sur les mouvements du sujet sont données par différents systèmes sensoriels : la vision, le système vestibulaire et la proprioception principalement. La réalité virtuelle est un outil qui permet, chez l'homme, de mettre en conflit le système visuel et les autres systèmes sensoriels.

Il a été montré que l'adaptation et la réadaptation à des réarrangements sensoriels étaient facilitées lorsque les différentes situations étaient alternées assez rapidement (quelques minutes) plutôt qu'exposées aux sujets sur de longues périodes. Ce phénomène a été appelé adaptation double (« dual adaptation »), et il nécessite la présentation d'indices sensoriels ou moteurs qui permettent de distinguer les situations de réarrangement sensoriel.

Le but de cette expérience est d'une part d'étudier les capacités d'adaptation de sujets sains à des situations de conflits sensoriels en réalité virtuelle, et donc de stocker de paramètres facilitant la réadaptation, et d'autre part d'étudier les informations nécessaires au choix des bons paramètres en fonction du contexte sensoriel et moteur. Les indices de l'environnement suffisent-ils à faire ce choix ou est-il nécessaire d'avoir un premier retour moteur ?

Le protocole consiste en la navigation de deux groupes de sujets dans des couloirs virtuels comportant 9 virages de 45,90 ou 135°. La translation est pas-

sive, c'est-à-dire que la vitesse de translation est constante et imposée par le système. La rotation est active, les sujets doivent tourner leur corps pour avoir l'impression de tourner dans le couloir virtuel. Un capteur magnétique de position est posé sur le casque de réalité virtuelle. Les sujets du groupe contrôle doivent tourner de 90° lorsqu'ils voient un virage virtuel de 90° et parcourent 12 couloirs. Les autres sujets sont exposés, en alternance sur 24 couloirs, à des situations de gain 1,5 où ils doivent tourner 1,5 fois plus que dans le monde réel, et de gain 0,5 où la rotation doit être réduite de moitié. Au total la navigation dure une heure. L'analyse des données porte essentiellement sur les profils de vitesse angulaire lors des rotations dans les virages. Les résultats semblent montrer que les sujets s'adaptent à ces situations de conflits, mais des expériences complémentaires sont nécessaires pour déterminer le rôle du premier retour moteur.

#### 10.4. INFLUENCE DES CADRES DE RÉFÉRENCE SUR LA MÉMOIRE SPATIALE DE TRAJETS EN TROIS DIMENSIONS

M. VIDAL, A. BERTHOZ, M.A. AMORIN, J. MCINTYRE

Les recherches expérimentales dans le domaine de la navigation concernent principalement les déplacements sur des surfaces simples au cours desquels seule la rotation en lacet doit être intégrée. Nous avons étudié l'adéquation des fonctions cognitives et sensorielles humaines à des situations plus complexes, notamment lors de la navigation dans des structures 3D de type bâtiment à plusieurs étages, et lors de déplacement incluant toutes les rotations de l'espace. La réalité virtuelle nous a permis de simuler ces déplacements dans des environnements de nature plus ou moins complexe. Les résultats expérimentaux que nous avons obtenus sont cohérents avec l'hypothèse de base sur la résolution de problèmes spatiaux tridimensionnels. D'une part nos capacités sont adaptées à une navigation naturelle, et d'autre part le traitement spatial de structures plus complexes est possible avec un déplacement naturel, bien que moins facile que pour une structure 2D. En effet, le traitement par le cerveau de la dimension verticale de l'environnement présente des caractéristiques distinctes de celles dans le plan horizontal. Finalement, les cadres de référence impliqués pour la mémorisation 3D indiquent une préférence pour la cohérence des rotations des déplacements avec l'axe corporel, et non avec l'axe gravitaire.

#### 10.5. IMPLICATION DES STRUCTURES MÉDIANES DU LOBE TEMPORAL DANS LA MÉMOIRE DES ROUTES

S. LAMBREY, A. BERTHOZ (LPPA) ; en coopération avec S. SAMSON, C. LANCELOT, S. DUPONT, M. BAULAC (Service de Neurologie Hôpital Pitié-Salpêtrière)

Deux façons de se représenter l'espace sont classiquement distinguées : 1) la représentation de type route qui consiste à mémoriser une séquence de repères auxquels sont associées des décisions de mouvement et 2) la représentation de type survol qui consiste en une vue de dessus de l'environnement et permet la

réalisation d'inférences spatiales (e.g. utiliser des raccourcis). Des études suggèrent que les structures médianes du lobe temporal droit (en particulier l'hippocampe droit) sont impliquées dans la représentation de type survol. En revanche, le rôle précis des structures homologues à gauche reste peu clair. Dans une étude de navigation en réalité virtuelle (1), nous avons testé la mémoire de type route chez des patients neurologiques ayant subi une résection des structures médianes du lobe temporal soit à droite soit à gauche. Il s'est avéré que seuls les patients opérés à gauche étaient significativement moins précis que les sujets contrôles lors du rappel de la séquence des repères le long du trajet parcouru, ainsi que lors du rappel de l'association entre un repère et la décision de mouvement correspondante. Au vu de ces résultats et des données rapportées dans d'autres études, nous avons suggéré une latéralisation fonctionnelle des structures médianes du lobe temporal, au-delà de leur implication dans la mémoire spatiale : les structures gauches seraient impliquées dans la mémoire des relations entre des items (e.g. séquence, association...) alors que les structures droites seraient plutôt impliquées dans tous les types de mémoire inférentielle (e.g. inférence transitive, inférence spatiale...).

#### 10.6. RELATION ENTRE LA VITESSE DE MARCHE ET LA COURBURE DE LA TRAJECTOIRE POUR DES TRAJETS LOCOMOTEURS COMPLEXES

H. HICHEUR, S. VIEILLEDENT, T. DUCOURANT (INSEP), A. BERTHOZ (LPPA) ;  
en collaboration avec la Société ATOPOS

Pour des actions de dessin, une loi liant la cinématique du mouvement de la main aux paramètres géométriques de la trajectoire de l'effecteur a été mise en évidence. Cette loi s'exprime sous la forme d'une relation linéaire, dite « loi de puissance 1/3 » qui lie la vitesse tangentielle du mouvement de la main au rayon de courbure de sa trajectoire. La validité de cette loi a été confortée par diverses études dans des paradigmes de perception visuelle du mouvement, de mouvements de la main dans l'espace en condition isométrique, et récemment, il a été montré qu'une telle relation entre cinématique du mouvement et géométrie de la trajectoire pouvait être corrélée avec l'activité de certaines populations de neurones dans le cortex moteur et pré-moteur. Une approche convergente entre la loi de puissance 1/3 et le modèle du « minimum jerk » a été proposée : dans cette étude, des formes géométriques complexes ont été étudiées (limaçon et feuille de trèfle).

Dans le domaine de la locomotion humaine considérée ici comme le déplacement du corps entier dans l'environnement, si plusieurs études ont permis d'apporter des informations quant aux comportements moteurs spécifiques (anticipation de la direction à venir par la tête, par exemple) lors de la marche, peu d'études ont permis de tester des lois de mouvement liant la vitesse de déplacement du corps entier et la géométrie de sa trajectoire. Récemment, nous avons montré que la portée de la loi de puissance 1/3 au mouvement du corps entier lors de la marche sur des trajets elliptiques. Ces dernières observations tendraient

à renforcer l'idée d'une loi perçue comme un principe organisateur important dans le contrôle du mouvement chez l'homme. Nous avons éprouvé ces résultats en utilisant des formes plus complexes (limaçon et feuille de trèfle) déjà étudiées pour des mouvements de la main. Les sujets devaient marcher le long d'une de ces deux formes tracées au sol et qui avaient un périmètre de 20 mètres chacune. Le mouvement des sujets était enregistré dans cet espace de grande dimension à l'aide d'un système VICON équipé de 24 caméras. Nos résultats montrent le même type de relation linéaire entre vitesse de marche et courbure de la trajectoire. Cependant cette relation ne répond pas strictement à une loi de puissance  $1/3$  puisque cette valeur n'a été observée que pour l'une des deux formes de trajets (0.31 pour la feuille de trèfle et 0.2 pour le limaçon). Si nos travaux montrent clairement que les contraintes géométriques du trajet locomoteur influent sur la cinématique du mouvement du corps, la nature et le type de relation liant la géométrie du trajet à la vitesse de déplacement restent encore à déterminer.

#### 10.7. PHÉNOMÉNOLOGIE DES KINESTHÈSES

J.-L. PETIT, A. BERTHOZ

Venu auprès d'A. Berthoz à la suite d'une longue collaboration avec lui pour l'organisation d'Ateliers de philosophie de l'action et neurosciences à Strasbourg, à l'Institut Biomédical des Cordeliers, et à la Fondation Hugot du Collège de France, J.-L. Petit a organisé sur le même thème au Collège de France une série de Journées interdisciplinaires dont les travaux vont paraître en un volume double publiés sous sa direction de la revue *Intellectica* en octobre prochain. Parallèlement à ces activités orientées vers la modification du contexte épistémologique des sciences cognitives en fonction des résultats récents en neurosciences. Le projet de recherche est centré sur une interprétation de la nouvelle physiologie de l'action et de l'anticipation dans une perspective philosophique dont les ressources ont été regrettamment méconnues en faveur d'autres traditions par les sciences cognitives. Cette perspective est la phénoménologie, plus précisément la théorie de la constitution du monde vécu sur la base du système kinesthésique, théorie dont le philosophe Husserl a jeté les bases dans la dernière partie de son œuvre. Procédant à « l'extraction » des intuitions empiriquement testables à partir des transcriptions de manuscrits inédits de ce philosophe, J.-L. Petit a tenté une première mise à l'épreuve de ces intuitions dans la discussion avec les neurophysiologistes. Les enregistrements de nos dialogues ont donné un fort volume de 400 pages. Soumis à l'éditeur, ce volume a été retenu en tant que base pour un ouvrage de philosophie de la physiologie qui, une fois réélabéré et reciblé pour un lectorat plus large que la communauté des spécialistes de philosophie phénoménologique et de sciences du cerveau, pourrait développer des idées nouvelles sur l'anticipation et devrait replacer ces thèmes sur la toile de fond d'une phénoménologie des kinesthèses.

## SÉMINAIRES

*Séminaires organisés par le laboratoire*

2002

— 11 janvier 2002 : Pr C. BLAKEMORE (Université d'Oxford, Royaume-Uni), « The genetic basis of cortical plasticity ».

— 23 janvier 2002 : Pr M. GLUCK (Neuroscience Dept. Rutgers Univ. Newark, USA), Apprentissage et généralisation chez les sujets amnésiques, Parkinsoniens ou souffrant de la maladie d'Alzheimer : Résultats et discussion des simulations d'un modèle des ganglions de la base et de l'hippocampe.

— 10 juin 2002 : Pr L. ZUPAN (Jenks Vestibular Physiology Laboratory, Massachusetts Eye and Ear Infirmary, Boston, MA, USA), « Influence of rotational cues on the neural processing of gravito-inertial force ».

2003

— 27 janvier 2003 : Dr M. BARBU-ROTH (LPBD, EPHE, Paris) et Dr David Y. Anderson (UC Berkeley, San Francisco), « Locomotion autonome et son rôle sur la structuration de l'espace chez le bébé ».

— 14 février 2003 : Dr N. CATZ (Department of cognitive neurology, Université de Tübingen, Allemagne), « Saccadic adaptation, an example of motor learning : biological meaning and neuronal substrate ».

— 10 mars 2003 : Dr B. RIECKE (Max Planck Institut, Tübingen, Allemagne), « How far can we get with just visual information ? Path integration and spatial updating studies in Virtual Reality ».

— 11 mars 2003 : Pr A.H. WERTHEIM (Dept of Psychonomics, Université d'Utrecht, Pays-Bas), « An attempt to explain the freezing illusion and the Pavard and Berthoz effect as similar phenomena ».

— 14 mars 2003 : Dr A. MARTINELLI (Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne EPFL), « Theories of map representation in robotics navigation ».

— 1<sup>er</sup> avril 2003 : Dr C. KOIKE (INRIA, Paris), « Bayesian Robot Programming : experiments for BIBA ».

— 10 avril 2003 : Dr G. OLIVIER (Laboratoire de Psychologie Expérimentale et Quantitative LPEQ, Nice, Sophia Antipolis), « L'image mentale ment-elle ? ».

— 12 mai 2003 : Pr H. DAMASIO (Professeur à l'Université d'Iowa, USA), « Neural Correlates of Language Processing ».

— 3 juin 2003 : Dr L.H. ZUPAN (Research Associate, Massachusetts Eye and Ear Infirmary Instructor, Department of Otolaryngology, Harvard Medical School — Affiliate Faculty, Harvard/MIT Division of Health Science and Technology, Boston, MA, USA), « Using post-illusory tilt rotation to study how the CNS estimates gravity and linear acceleration ».

— 10 juin 2003 : Pr K. CULLEN (McGill University, Montréal Dept. Physiology/Aerospace Medical Research Unit, Canada), « Signal Interactions in the Vestibular Nuclei during Natural Behaviors ».

— 29 juin-4 juillet 2003 : Pr A. BERTHOZ et J. DROULEZ (Laboratoire de Physiologie pour la Perception et de l'Action — LPPA, Collège de France, Paris), Biba Summer School 2003, Chichilianne, France, Models of Perception and Action : Pr. A. BERTHOZ : « Neural basis of cognitive strategies and reference frames during navigation » ; J. DROULEZ : « Bayesian modelling and matching : an example of exteroceptive and proprioceptive data fusion ».

— 1<sup>er</sup> juillet 2003 : Pr T. ISA (Dept. of Integrative Physiology, National Institute of Physiological Sciences, Okazaki, Japon), « Dynamic modulation of signal transmission in the local circuits of the superior colliculus ».

#### PUBLICATIONS

##### *Revue à comité de lecture*

BEN HAMED, S., DUHAMEL, J.R., BREMMER, F. & GRAF, W. (2002) : Visual receptive field modulation in the lateral intraparietal area during attentive fixation and free gaze, *Cereb. Cortex*, 12 : 234-245.

BERTHOZ, A, SOMERS, J.T., RESCHKE, M.F. & TAYLOR, L.C. (2002) : Smooth pursuit tracking : Saccade amplitude modulation during exposure to microgravity, *Ann. NY Acad. Sci.*, 956 : 426-429.

BREMMER, F., BEN HAMED, S., DUHAMEL, J.-R. & GRAF, W. (2002) : Optic flow processing in the macaque ventral intraparietal area (VIP). *Eur. J. Neurosci.*, 16, 1554-1568.

BREMMER, F., KLAM, F., DUHAMEL J.-R., BEN HAMED, S. & GRAF, W. (2002) : Visual-vestibular interactive responses in primate ventral intraparietal area (VIP). *Eur. J. Neurosci.*, 16 : 1569-1586.

BUCCI, M.-P., KAPOULA, Z., YANG, Q., ROUSSAT, B. & BRÉMOND-GIGNAC, D. (2002) : Binocular coordination of saccades in children with strabismus before and after surgery, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 43 (4) : 1040-1047.

BUCCI, M.-P., PARIS, S. & KAPOULA, Z. (2003) : Oculomotor consequences of feeble image size inequality at near reading distance. *Exp. Brain Res.*, 149 (2) : 252-259.

BÜTTNER-ENNEVER, J.A., HORN, A.K.E., GRAF, W. & UGOLINI, G. (2002) : Modern concepts of brainstem anatomy from extraocular motoneurons to proprioceptive pathways. *Ann. NY Acad. Sci.*, 956 : 75-84.

CAMPANA, A.L.M., RONDI-REIG, L., TOBIN, C., LOHOF, A.M., PICQUET, F., FALEMPIN, M., WEITZMAN, J.B. & MARIANI, J. : p. 53 inactivation leads to impaired motor synchronization in mice. *Eur. J. Neurosci.* (2003), 17, 1-12.

CORNILLEAU-PEREZ, V., WEXLER, M., DROULEZ, J., MARIN, E., MIEGE, C. & BOURDONCLE, B. (2002) : Visual perception of planar orientation : dominance of static depth cues over motion cues, *Vision Res.*, 42 (11) : 1403-1412.

COUBARD, O., KAPOULA, Z., MURI, R. & RIVAUD-PICHOUX S. (2002) : Effects of TMS over the right prefrontal cortex on latency of saccades and convergence. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sc.*, 44 : 600-609.

DAUNYS, G., PALIULIS, E. & KAPOULA, Z. (2002) : Estimation of three-dimensional eye rotations coordinates by electromagnetic method. Electronics and electrical engineering, *Kaunas Technologija*, 3 (38) : 7-11.

DORICCHI, F., SIEGLER, I., IARIA, G. & BERTHOZ, A. (2002) : Vestibulo-ocular and optokinetic impairments in left unilateral neglect. *Neuropsychologia*, 40 (12) : 2084-2099.

DROULEZ, J., PEH, C., PANERAI, F., CORNILLEAU-PEREZ, V. & CHEONG, L. (2002) : Absolute distance perception during in-depth head movement calibrating optic flow with extra-retinal information, *Vision Res.*, 42 (16) : 1991-2003.

GLASAUER, S., AMORIM, M.A., VIAUD-DELMON, I. & BERTHOZ, A. (2002) : Differential effects of labyrinthine disfunction on distance and direction during blind-folded walking of a triangular path, *Exp. Brain Res.*, 145 (4) : 489-497.

GRAF, W., GERRITS, N., YATIM-DHIBA, N. & UGOLINI, G. (2002) : Mapping the oculomotor system : the power of transneuronal labelling with rabies virus. *Eur. J. Neurosci.*, 15 (9) : 1557-1562.

GRAF, W., GILLAND, E., MCFARLANE, M., KNOTT, L. & BAKER, R. (2002) : Central pathways mediating oculomotor reflexes in an elasmobranch, *Scyliorhinus canicula*. *Biol. Bull.*, 203 : 236-238.

GRANTYN, A., BRANDI, A., DUBAYLE, D., GRAF, W., UGOLINI, G., HADJIDIMITRAKIS & MOSCHOVAKIS, A. (2002) : Density gradients of trans-synaptically labeled collicular neurons after injection of rabies virus in the lateral rectus muscle of the rhesus monkey. *J. Comp. Neurol.*, 451 : 346-361.

ISRAËL, I., NICO, D. & BERTHOZ, A. (2002) : Interaction of visual and idiothetic information in a path completion task. *Exp. Brain Res.*, 146 (3) : 379-382.

KAPOULA, Z., YANG, Q., COUBARD, O., DAUNYS, G., ORSSAUD, C. (2002) : Effects of TMS of posterior parietal cortex on isolateral and combined saccade-vergence eye movements. *Neuroreport.*, 13 (15), 1893-1897.

KAPOULA, Z., BUCCI, M.P. (2002) : Distribution-dependent saccades in children with strabisms and in normals, *Exp. Brain Res.*, 143 (2) : 264-268.

KAPOULA, Z., DAUNYS, G., HERBEZ, O. & MENU, M. (2002) : Exploration oculo-motrice du réveil matin de Fernand Leger. *Techne* (Journal du Centre de recherche et de restauration des Musées de France), « *La Vision des Œuvres* », 15 : pp. 83-93.



KAPOULA, Z., EVDOKIMIDIS, I., SMYRNI, N., BUCCI, M.P. & COSTANDINIDIS, T. (2002) : EEG cortical potentials preceding vergence and combined saccade-vergence eye movements. *Neuroreport.*, 28 ; 13 (15) : 1893-1897.

KEMENY, A., PANERAI, F. (2003) : Evaluating Perception in driving simulation experiments. *Cognitive Sciences*, 7 (1), pp. 31-37.

LAMBREY, S., VIAUD-DELMON, I. & BERTHOZ, A. (2002) : Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path travelled in virtual reality, *Cogn. Brain Res.*, 14 (1) : 177-186.

LEPICARD, E.V., VENAULT, P., NEGRONI, J., PEREZ-DIAZ, F., JOUBERT, C., NOSTEN-BERTRAND, M., BERTHOZ, A. & CHAPOUTIER, G. (2003) : Posture and balance responses to a sensory challenge are related to anxiety in mice, *Psychiatry Research*, 118 : 273-284.

MILEA, D., LOBEL, E., LE HERICY, S., DUFFAU, H., RIVAUD-PECHOUX, S., BERTHOZ, A. & PIERROT-DESSEILLIGNY, C. (2002) : Intraoperative frontal eye field stimulation elicits ocular deviation and saccade suppression, *Neuroreport.*, 13 (10) : 1359-1364.

MARTIN, P.D. & BERTHOZ, A. (2002) : Development of spatial firing in the hippocampus of young rats, *Hippocampus*, 12 (4) : 465-480.

NAKAZAWA, K., SUN, L.D., QUIRK, M.C., RONDI-REIG, L., WILSON, M.A., TONEGAWA, S. (2003) : Hippocampal CA3 NMDA receptors are crucial for memory acquisition of one-time experience. *Neuron.*, 38 (2) : 305-315.

PANERAI, F., CORNILLEAU-PÉRÈS, V. & DROULEZ, J. (2002) : Contribution of extra-retinal signals to the scaling of object distance during self-motion. *Perception & Psychophysics*, 64 (5) : 717-731.

PARIS, S., KAPOULA, Z., BUCCI, M.P. & DAUNYS, G. (2002) : Vertical memory-based disconjugate learning for downward saccades at a viewing distance of 70 cm : relation to horizontal vergence and to vertical phoria. *Exp. Brain Res.*, 146, 4 : 474-480.

REYMOND, G., DROULEZ, J. & KEMENY, A. (2002) : « Visuo-vestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process ». *Biol. Cybern.*, 87 (4) : 301-314.

ROCHEFORT, N., QUENECH'DU, N., WATROBA, L., MALLAT, M., GIAUME, C. & MILLERET, C. (2002) : Microglia and astrocytes may participate in the shaping of visual callosal projections during postnatal development. *J. Physiol. (Paris)* 96 : 183-192.

SENOT, P., PRÉVOST, P. & MCINTYRE, J. (2003) : Estimating time to contact and impact velocity when catching an accelerating object with the hand. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 29 : 219-237.

SIEGLER, I., ISRAËL, I. (2002) : The importance of head-free gaze control in humans performing a spatial orientation task. *Neurosci. Lett.*, 333 : 99-102.

TABUCHI, E., MULDER, A.B., WIENER, S.I. (2003) : Reward value invariant place responses and reward site associated activity in hippocampal neurons of behaving rats. *Hippocampus*, 113 : 117-132.

VAN BOXTEL, J., WEXLER, M. & DROULEZ, J. (2003) : Perception of plane orientation from self-generated and passively observed optic flow. *The Journal of Vision* 3 (5), 318-332.

VIAUD-DELMON, I., BERTHOZ, A. & JOUVENT, R. (2002) : Multisensory integration for spatial orientation in trait anxiety subjects : absence of visual dependence. *Eur. J. Psychiatry*, 17 (4) : 194-199.

WEXLER, M. (2003) : More to 3D vision than meets the eye. *Cognitive Sciences*, 6, 497-498.

WEXLER, M. (2003) : Voluntary head movement and allocentric perception of space. *Psychological Science*, 14, 340-346.

WIENER, S.I., BERTHOZ, A. & ZUGARO, M.B. (2002) : Multisensory processing in the elaboration of place and head direction responses by limbic system neurons, *Cogn. Brain Res.*, 14 (1) : 75-90.

YANG, Q., BUCCI, M.-P., KAPOULA, Z. (2002) : The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 43 (9) : 2939-2949.

ZUGARO, M.B., BERTHOZ, A. & WIENER, S.I. (2002) : Peak firing rates of rat anterodorsal thalamic head direction cells are higher during faster passive rotations. *Hippocampus*, 12 : 481-486.

ZUGARO, M.B., ARLEO, A., BERTHOZ, A. & WIENER, S.I. (2003) : Rapid spatial reorientation and head direction cells. *J. Neurosci.* 2003.15, 23 (8) : 3478-3482.

#### *Ouvrages. Diffusion Grand Public*

BERTHOZ A. (2003) : *La Décision*, Éd. Odile Jacob, Paris, 391 pp.

WIENER S.I., Consultant à la Cité des Sciences pour l'Exposition « Le cerveau intime », Exposition « Sortir du labyrinthe ? », octobre 2002.

#### *Chapitres d'ouvrages collectifs*

GRAF, W. DER GLEICHGEWICHTSSINN, (2003) : in *Lehrbuch der Vorklinik. Teil B : Anatomie, Biochemie und Physiologie des Nervensystems und des Bewegungsapparates*. Eds. : R.F. Schmidt and K. Unsicker (Section Editors : N. BIRBAUMER, A. KURTZ, M. SCHARTL and K. UNSICKER). Deutscher Ärzte-Verlag : Köln, pp. 207-222.

MCINTYRE, J., ZAGO, M., BERTHOZ, A. & LACQUANITI F. (2003) : The Brain as a Predictor : On Catching Fly Balls in Zero Gravity. In : J. BUCKEY and J. HOMICK (Eds.). *The Neurolab Spacelab Mission : Neuroscience Research in Space*, NASA Special Publication, pp. 55-62.

PETIT, J.-L. (2002) : La constitution par le mouvement : Husserl à la lumière des données neurobiologiques récentes. In : PETITOT, J., VARELA, F.-J., PACHOUD, B., ROY, J.-M. (éds) *Naturaliser la Phénoménologie. Essais sur la Phénoménologie contemporaine et les Sciences cognitives*. Paris : CNRS Éditions, Ch. 6, pp. 283-311.

*Conférences sur invitations*

2002

ARLEO A. :

— « Processing multimodal sensory information for spatial learning and navigation : Computational modeling, robotics, and rat experiments », International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior, UK 10 août 2002.

— « Robotic implementation of a model of hippocampal and head direction cells ». Conférence Internationale sur l'Orientation Spatiale, Fondation des Treilles, France, septembre 2002.

BERTHOZ, A. :

— Congrès international : Mouvement, Attention et Perception, Conférence inaugurale « Le sens du mouvement », Poitiers, 19/21 juin 2002.

— The Cognitive Foundation of Mathematics : « The cognitive foundations of geometry : maps or movement », Rome, 9/10 septembre 2002.

— Colloque international, « Brain basis of spatial orientation », Reference frames during navigation, organisé par la Fondation Treilles, Tourtour, 12/17 septembre 2002.

— Journée du Réseau de Sciences Cognitives d'Ile-de-France, « Les Sciences Cognitives : Bilans et Perspectives », Collège de France, Paris, 18 octobre 2002.

— Congrès international : Il senso della memoria « Bases neuronales de la mémoire de l'espace », Accademia Nazionale dei Lincei, Rome, 25 octobre 2002.

— 14th Annual Meeting of the European Academy of Childhood Disability : Treatment of Childhood Disabilities, « Perceptual disorders », Pise, Italie, 26 octobre 2002.

— XV<sup>e</sup> Entretiens du Centre Jacques Cartier, « Le cerveau dans ses sens » « Contribution du système vestibulaire à l'orientation dans l'espace ». École Normale Supérieure de Lyon, France, 1<sup>er</sup>/2 décembre 2002.

— VII<sup>e</sup> Congrès Société Européenne de Neurologie Pédiatrique, « La Neuropédiatrie d'hier et de demain », Dialogue entre A. Berthoz, Jean-Pierre Changeux, Philippe Evrard Gilles Lyon et Henri Szliwowski, Palais des Congrès, Paris, 1<sup>er</sup>/4 décembre 2002.

— Colloque International « Cognitive » : « Stratégies cognitives et mémoire spatiale », La Sorbonne, Paris, 6/7 décembre 2002.

— Réunion d'Hiver, Société de Neurophysiologie Clinique de Langue Française : Neurophysiologie des Mémoires. « Bases neurales et référentiels de la mémoire des trajets. Étude par imagerie cérébrale ». Paris-Bercy, 16/17 décembre 2002.

— Symposium International sur « Limbic and Association Cortical Systems : Basic, Clinical and Computational Aspects », « Contribution of limbic and association areas to egocentric and allocentric reference frames for spatial memory during navigation », Toyama, Japon, 7/12 octobre 2002.

GRAF, W. :

— École d'été en Neurosciences, « Modèles d'apprentissage moteur et de plasticité adaptative », Concarneau, 18 août/1<sup>er</sup> septembre 2002.

— International Satellite Symposium to the Bárány Society Meeting : « Vestibular Influences on Movement ». Orca Island, Seattle, 26/29 septembre 2002.

— International Symposium on The Role of Vestibular Organs in Space Exploration. Portland, OR, 1<sup>er</sup>/3 octobre 2002.

— J.B. Johnston Club (Brain, Behav. Evol.), Orlando, 1<sup>er</sup>/2 novembre 2002.

— Annual Meeting of the Society for Neuroscience, Orlando, 2/7 novembre 2002.

— Conférence Prix Antoine Lacassagne : « 1. Bases neurales de la perception du mouvement propre : neurophysiologie des entrées multi-sensorielles dans le cortex pariétal », Collège de France, 17 décembre 2002.

ISRAËL, I. :

— Sélection des informations idiothétiques et temporelles dans la navigation. Laboratoire de Psychologie Expérimentale, Univ. Paris-5, Boulogne-Billancourt, 6 mai 2002 (Prof. K. O'REGAN).

— Nature morte à l'Otolithe. CHU de Caen, 29 janvier 2002. (Prof. P. DENISE).

— Navigation linéaire : vestibule et proprioception, vision et temps. Université Biomédicale des Saints-Pères, Paris, 19 décembre 2002 (A. ROBI-BRAMI, P.P. VIDAL).

KAPOULA, Z. :

— Memory and eye movements exploration of the painting « The Alarm clock » of Fernand Léger. Département de Neurologie, Université d'Athènes, Hôpital Eginition, Athènes, 18 juillet 2002.

— Oculomotor exploration of the Alarm clock of Fernand Léger. Active Vision Meeting, University of Durham, England, 23 septembre 2002.

— Mouvements oculaires d'exploration du tableau « Le réveil matin » de Fernand Léger. Group Perception et Facteurs Humains, Peugeot Vélizy, 5 novembre 2002.

MCINTYRE, J. :

— Motor Control And Proprioception : Physiology, Pathology And Recovery : Feedforward versus Feedback Control of Biological Movement. Paris, 9/12 juillet 2002.

— 7th European Workshop on Ecological Psychology : Are the concepts of internal models and representational physics incompatible with the Ecological Psychology approach ? Bandol, 4/6 juillet 2002.

— Workshop on Movement, Action and Visual Selection : « Internal Representations and Coordinate Frames for Human Motor Control ». Dourdan, France, 12/13 décembre 2002.

MILLERET, C. :

— « Plastic changes in the visual callosal cortical map during development and at adulthood in mammal : differences and similarities », Symposium « From developmental to adult plasticity : beyond phenomenological similarities », ESPCI, Paris, 2002.

PARADIS, A.-L. :

— Séminaire « Images Virtuelles : Bases neurales de la perception du flux optique et des formes 3D ». Collège de France, Paris, 10 juin 2002.

PETIT, J.-L. :

— « Les bases neurobiologiques de la constitution ». Exposé au Séminaire interne du CREA Paris, 4 juin 2002.

— « Objectivisme et anti-objectivisme dans les neurosciences cognitives. Aspects philosophiques dans les sciences cognitives », Rencontre de l'Académie Internationale de Philosophie des Sciences, Paris, La Sorbonne, 20/22 juin 2002.

— « Introduction à l'étude phénoménologique et physiologique de la constitution du monde perçu ». Exposé à la Réunion Cognitive org. T. Pozzo, ufr staps, Université de Bourgogne, Dijon, 17 septembre 2002.

— « Ceci » n'est pas la désignation. Exposé au groupe « Déictique », avec A. Berthoz, J. Droulez, N. Bullot, LPPA, 18 septembre 2002.

RONDI-REIG, L. :

— « Cerebellum and spatial navigation : behavioral and neurogenetic perspectives ». Journées Franco-Italiennes, Collège de France, Paris (France), 21 octobre 2002.

— « Conséquence d'une inactivation génique sur les processus neuraux de la navigation : utilisation de souris knock-out et transgéniques conditionnelles ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut Fédératif de Recherche 52 « Transduction de signaux. Molécules à action centrale et périphérique », Collège de France, Paris, 8 novembre 2002.

— « Conséquence d'une inactivation génique sur la mémoire et la navigation ». Réunion du groupe cnes, Université de Montpellier II, Montpellier, France. 17 décembre 2002.

WIENER, S. :

— Symposium Comparative brain mechanisms for spatial orientation and navigation, « Head direction cells and spatial orientation ». Paris, 15 juillet 2002.

— Conférence sur Brain Basis of Spatial Orientation « 1) Orienting movements and AD head direction cells ; 2) Hippocampus, nucleus accumbens and orienting movements ». La Fondation des Treilles, 14 septembre 2002.

— Symposium International sur « Limbic and Association Cortical Systems : Basic, Clinical and Computational Aspects », « Spatial and behavioral correlates in nucleus accumbens neurons in zones receiving hippocampal or prefrontal cortical inputs ». Toyama, Japon, 11 octobre 2002.

2003

ARLEO, A. :

— Séminaire invité : « Integrating multimodal sensory inputs for spatial orientation : Computational modeling, robotics, and rat experiments », Max Planck Institute for Biological Cybernetics, Allemagne, 27 juin 2003.

BERTHOZ, A. :

— Journée organisée par la Chaire de Philosophie des Sciences Biologiques et Médicales et l'Unité de Neuropédiatrie, Paris V « Épilepsies, connaissance du cerveau et société », Table ronde et discussion, Collège de France, Paris, 28 mars 2003.

— Conférence Variabilité cérébrale : de l'adaptation à l'évolution, « Cognitive strategies and brain mechanisms of spatial memory », Institut Pasteur, Paris, 11/12 avril 2003.

— 9th EWIC, European Workshop on Imagery and Cognition : « The neural basis of spatial cognition », Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Psicologia, Pavie, Italie, 25/27 avril 2003.

— Colloque « De l'approche systématique aux sciences cognitives » : « Décision et stratégies cognitives : dialoguer avec son double ». LEACM/Institut des Sciences de l'Homme, Université Claude Bernard Lyon I, 16 mai 2003.

— Journée « Espace », « Le sens de l'espace et l'espace des sens », Université Paris XI, Orsay, 6 juin 2003.

— Journée en l'honneur de la senso-motricité à la Cognition Pierre et Arlette Buser, « Bases neurales du contrôle du regard », Université Pierre et Marie Curie, Paris, 20 juin 2003.

BULLOT, N. J. :

— Objects and aesthetic attention. Interdisciplines, Symposium sur Internet : Art and Cognition, <http://www.interdisciplines.org/>, janvier 2003.

DROULEZ, J. :

— Séminaire Renault « images virtuelles ». D. Toffin, A. Kemeny, J. Droulez, J. McIntyre « Transferts entre directions visuelles et directions haptiques », Paris, janvier 2003.

GRAF, W. :

— Conférence Prix Antoine Lacassagne : « 2. Bases neurales et biomécaniques de l'orientation spatiale : neuroanatomie et anatomie fonctionnelle dans l'évolution des vertébrés », Collège de France, 10 janvier 2003.

— Symposium : Locomotion and Spatial Orientation, « Vestibular signals in the posterior parietal cortex : role for self-motion perception », Mt. Sinai School of Medicine, New York. 29 janvier 2003.

— International Symposium : Physiology and Disorders of Ocular Motor and Vestibular Control, « Vestibular signals in posterior parietal cortex neurons during active and passive head movements in macaque monkeys », München-Wildbad Kreuth, 3/5 avril 2003.

— European Science Foundation-European Research Conferences Iv : Computational Mechanisms for the Generation and Perception of Action in 3D Space. « Vestibular signals in the posterior parietal cortex during active and passive head movements : processing of self-motion perception », Aquafredda di Maratea, 5/10 avril 2003.

« Deutschland und Frankreich — Zukunft Europas », Adresse aux Baccalauréats 2003. Albertus-Gymnasium, Lauingen, 27 juin 2003.

MCINTYRE, J. :

— École Thématique : « Réalité Virtuelle et Sciences de Comportement ». Marseille, France, 19/23 mai 2003.

— The 8th International Table Tennis Federation Sports Science Congress and The 3rd World Congress of Science and Racket Sports : « Does the brain model the laws of physics ? On catching and intercepting flying objects », INSEP, Paris, France, 17/19 mai 2003.

MILLERET, C. :

— « Intégration interhémisphérique visuelle par le corps calleux et plasticité chez le mammifère supérieur ». Journée en l'honneur de Pierre Buser et Arlette Rougeul-Buser : « De la sensori-motricité à la Cognition », Université Pierre et Marie Curie, Paris, 20 juin 2003.

PETIT, J.-L. :

— Le corps propre : phénoménologie et neurosciences. Conférence aux Assises de la fney : « De la relation corps-esprit ». Table ronde avec J.-C. Ameissen & G. Chapouthier. Palais des Congrès, Dijon, 29 mai 2003.

— Neuroplasticité, somatotopie et codage. Conférence à la Journée du CeSeF. « Plasticité, cartes somatotopiques et codage » École des Mines, Paris, 5 juin 2003.

RONDI-REIG L. :

— Conséquences d'une inactivation génique sur les processus neuraux de la mémoire spatiale et non spatiale. 28 mars 2003. 8<sup>e</sup> mini-colloque des étudiants de Physiologie moléculaire et physiopathologie, Université d'Orléans, UFR Sciences, Département de Biologie, Orléans (France).

WIENER, S.I. :

— Conférence sur « Les contributions vestibulaires aux représentations cérébrales de l'orientation et de la position de la tête dans l'espace », Institut de Recherche Oto-Neurologique, Centre d'Explorations Fonctionnelles Otoneurologiques, Paris.

— IFR Neurosciences Cliniques et Expérimentales, « L'élaboration de signaux directionnels et spatiaux dans le système limbique hippocampique, et leur rôle dans l'orientation », Université Victor Segalen, Bordeaux.

— Symposium sur « Les Mécanismes corticaux et sous-corticaux de la préparation de l'action », Convergence d'informations multisensorielles et motrices dans les réponses des neurones de l'hippocampe, 6<sup>e</sup> Colloque Soc. Neurosci., Rouen.

— Symposium sur « Les Stratégies Cognitives et Orientation Spatiale » (rencontre entre anthropologues et psychobiologistes), Hiérarchies dans les stratégies de navigation chez les robots et chez les animaux. Collège de France, Paris.

— Séminaire de la Chaire de Neuropharmacologie : Dopamine, Glanglions de la base, Cortex Préfrontal : rétropectives et perspectives : « Bases neuronales des fonctions cognitives au niveau du striatum dorsal et ventral », Collège de France, Paris.

*Communication avec actes*

2002

— ARLEO, A. & GERSTNER, W. : « A model of the rat spatial learning system : Studying the interrelation between idiothetic and allothetic cues ». In : Third Forum of European Neuroscience, Paris, vol. 1, A075.6.

— ARLEO, A. : « Processing multimodal sensory information for spatial learning and navigation : Computational modeling, robotics, and rat experiments ». In : Seventh Int. Conf. on the Simulation of Adaptive Behavior, from Animals to Animats-SAB2002, Edinburgh, UK.



- COATES, N., EHRETTE, M., BLACKHAM, G., HEIDET, A., KEMENY, A. : « Head-Mounted Display in Driving Simulation Applications in CARDS ». Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, pp. 33-43.
- COMMITTERI, G., GALATI, G., PARADIS, A.-L., POLINE, J.-B., BERTHOZ A., PIZZAMIGLIO, L. and LE BIHAN, D. : « Egocentric and allocentric coding of relative distance in a 3D environment : lingual/parahippocampal activation during environmental judgements ». Paris, p. 75.
- DAGDELEN, M., REYMOND, G., KEMENY, A. : « Analysis of the visual compensation in the Renault driving Simulator ». Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, pp. 109-119.
- GRANTYN, A., KUZE, B., BRANDI, A.M. & THOMAS, M.A. : « Contribution of pontine omnipause neurons (OPN) to eye-head coordination in the cat ». Proc. XXII Meeting of Barany Society, Seattle, USA, n° P9-3.
- ISRAËL, I. : « The otoliths : a single multisensory system ? ». 3rd Annual Meeting of the International Multisensory Research Forum, Geneva, Switzerland.
- ISRAËL, I., CAPELLI, A. & LECOQ, C. : « Interactions multifactorielles impliquées dans l'estimation d'une distance lors de transports linéaires : un espace pour le temps ? ». Journée du Réseau de Sciences Cognitives d'Île de France, Collège de France, Paris.
- ISRAËL, I., LECOQ, C. & CAPELLI, A. : « Perception du mouvement propre : temps ou espace ? ». Collège de France, Journée de l'Institut de Biologie.
- KEMENY, A. : « Vehicle control in driving simulation experiments ». Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, pp.17-20.
- KLAM, F. & GRAF, W. : « Vestibular signals in posterior parietal cortex neurons of macaque monkeys during active head movements ». Soc. Neurosci. Abst., 28 : 266.18.
- MAGNAC, R., ISRAËL, I. & FÉRY, Y.A. : « Active control of the direction of body rotation facilitates the updating of egocentric locations ». Forum of European Neuroscience, Paris.
- MCINTYRE, J., SENOT, P., PRÉVOST, P. : « Effect of temporal constraints on optimal catching strategies ». Seventh International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior, Edinburgh, Scotland.
- MOURAS, H., STOLÉRU, S., BITTOUN, J., GLUTRON, D., PRUD'HOMME, J., JOLIVET, O., PARADIS, A.-L. & BURNOD, Y. : « A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study of brain processing of visual sexual stimuli in healthy men ». Paris, p. 138.
- PARADIS, A.-L., SCHWARTZ, D., LAHAYE, P.-J., GARNERO, L., POLINE, J.-B. *et al.* : « Dynamics of cerebral activity during motion perception, comparing 3-D structure from motion and 2-D random motion : preliminary MEG results ». 3rd Forum of European Neuroscience, Paris.

- PARADIS, A.-L., LAHAYE, P.-J., SCHWARTZ, D. & DROULEZ, J. : « MEG study of the processing of 2-D motion and 3-D structure-from-motion ». *Perception* 31 supplement : 121-122. 25th European Conference on Visual Perception (ECVP), Glasgow.
- PARIS, S., NATHAN, F., KAPOULA, Z. : « Où placer l'information essentielle à l'intérieur d'un véhicule ? » Conférence : Proceedings, Intelligent Transport System, Lyon.
- PETIT, J.-L. : « Objectivisme et anti-objectivisme dans les neurosciences cognitives ». Rencontre de l'Académie Internationale de Philosophie des Sciences : « Aspects philosophiques dans les sciences cognitives ». Paris, Sorbonne.
- PETIT, J.-L. : « Objectivisme cognitiviste et objectivation dans les neurosciences ». Colloque en hommage à J.N. KAUFMANN : « Action, Attitudes et Décision ». Université du Québec à Trois-Rivières.
- PRÉVOST, P., MCINTYRE, J., SENOT, P., BERTHOZ, A., SLOTINE, J.-J. : « Do we catch free-falling object as robots do ? ». Third Forum of European Neuroscience, Paris.
- PRÉVOST, P., MCINTYRE, J., SENOT, P., BERTHOZ, A., SLOTINE, J.-J. : « Interception versus tracking when catching free-falling objects ». 7th European Workshop on Ecological Psychology, Bandol.
- ROCHEFORT, N., QUENECH'DU, N., WATROBA, L., MALLAT & MILLERET, C. : « Microglia may participate to the shaping of visual cortical projections during development ». FEBS.
- RONDI-REIG, L., PETIT, G., WIENER, S.I., TONEGAWA, S., MARIANI, J., BERTHOZ, A. : « Analysis of behavioral strategies of CA1 NMDA receptors knockout mice during spatial orientation in the "Starmaze" ». Third Forum of European Neuroscience, vol. 1, A209.5, Paris.
- SENOT, P., BAILLET, S., RENAULT, B., BERTHOZ, A. : « Neural Basis of Catching : An EEG/MEG Study ? ». Third Forum of European Neuroscience, Paris.
- SENOT, P., PRÉVOST, P., MCINTYRE, J. : « How downward and upward trajectories influence timing of motor responses in virtual ball catching ». 7th European Workshop on Ecological Psychology, Bandol.
- STROESSLIN, T., KREBSER, C., ARLEO, A. & GERSTNER, W. : « Combining Multimodal Sensory Input for Spatial Learning ». In : proceedings of Artificial Neural Networks — ICANN'02, Madrid, Espagne.
- WATROBA, L., BUSER, P. & MILLERET, C. : « Impairment of binocular vision in the adult cat induces plastic changes in the callosal cortical map ». FEBS.
- WIENER, S.I., TABUCHI, E., MULDER, A.B. : « Neural representations of goal directed action in ventral caudate and nucleus accumbens ». *Soc. Neurosci. Abst.*, 32, 477.10.

— YANG, Q., BUCCI, M.P., KAPOULA, K. : « The latency of saccades, vergence and eye combined movements in children and adults ». 3rd Forum of European Neuroscience, Paris.

— ZUGARO, M.B., ARLEO, A., BERTHOZ, A., WIENER, S.I. (2002) : « Rapid reorientation in rat anterodorsal thalamic head direction cells ». Soc. Neurosci. Abst., 32, 584.7. Orlando (USA).

2003

— ARLEO, A. : « Hippocampal place cells and head direction cells : Computational modeling and electrophysiological experiments », International Symposium on Cognitive Robotics, Allemagne.

— « Studying hippocampal place cells and head direction cells : Computational modeling and electrophysiological experiments ». In : 6th Perception Conference, TWK2003, Tübingen.

— BUCCI, M.P., KAPOULA, Z., YANG, Q., WIENER-VACHER, S. & BRÉMOND-GIGNAC, D. : « Spatio-temporal characteristics of saccades, vergence and combined movements in children with vertigo ». 9th CVRS (Child Vision Research Society), Göteborg.

— BULLOT, N.J., DROULEZ, J., PYLYSHYN, Z. : « Keeping track of objects while exploring an informationally impoverished environment : Local deictic versus global spatial strategies ». Vision Sciences Symposium, Sarasota, Floride, USA.

— BURGUIÈRE, E., RUTTEMAN, M., DE ZEEUW, C.I., BERTHOZ, A., WIENER, S.I. RONDIREIG, L. : « Le rôle du cervelet dans l'orientation spatiale : études comportementales de souris transgéniques L7-PKCI ». 6<sup>e</sup> Colloque de la société des Neurosciences, Rouen.

— CAPELLI, A. & ISRAËL, I. : « Contamination du temps par le mouvement propre passif ». 6<sup>e</sup> Colloque de la Société des Neurosciences, Rouen.

— DAVESNE, F. : « Probabilistic model of optic flow », BIBA Winter School, Combloux.

— DAVESNE, F. : « Analyse of the precision and the reliability of a Bayesian Optic Flow technique on the BIBAbot, BIBA Summer School, Chichilianne.

— DEGRIS, T., BRUNEL, N., ARLEO, A. : « Rapid response of head direction cells to reorienting visual cues : A computational model ». In : proceedings of The Computational Neuroscience Meeting (CNS2003).

— DÉJEAN, C., ZUGARO, M.B., ARLEO, A., BURGUIÈRE, E. & WIENER, S.I. : « Des signaux visuels dynamiques décident quels repères visuels mettent à jour les cellules de direction de la tête chez le rat ». 6<sup>e</sup> Colloque de la Société des Neurosciences, (PH-25), Rouen.

— DROULEZ, J. : « Neurons as real time Bayesian processors », BIBA Winter School, Combloux.

- DROULEZ, J. : « Bayesian modelling and matching : an example of exteroceptive and proprioceptive data fusion », BIBA Summer School, Chichilianne.
- ISRAËL, I. & LECOQ, C. : « Visual target memory in dancers : selection of the reference frame ». 26th ECVF, Paris.
- KAPOULA, Z., YANG, Q. & BUCCI, M.P. : « Development of latency accuracy characteristics of saccades and vergence in children ». 9th CVRS (Child Vision Research Society) Göteborg, Suède.
- LAMBREY, S. & BERTHOZ, A. : « Switching versus Weighting : how interact conflicting visual and non-visual information for the memorization of a path traveled in virtual reality ? ». Cognitive Neuroscience Society : 10th annual meeting. New York, USA.
- LAURENS, J. : « Population coding and models of sensori-motor control », BIBA Winter School, Combloux.
- LAURENS, J. : « Bayesian modelling of self-motion perception in 6D ». BIBA Summer School, Chichilianne.
- LECOQ, C. & ISRAËL, I. : « Orientation spatiale : mémoires égo- et exocentrée ». 6<sup>e</sup> Colloque de la Société des Neurosciences, Rouen.
- MCINTYRE, J., SENOT, P., PRÉVOST, P., ZAGO, M., LACQUANITI, F. & BERTHOZ, A. : « The Use Of On-Line Perceptual Invariants Versus Cognitive Internal Models For The Predictive Control Of Movement And Action ». Proceedings of the 1<sup>st</sup> International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, Capri, Italie.
- PANAGIOTAKI, P., LAMBREY, S. & BERTHOZ, A. : « Can a sensorimotor conflict influence the memorisation of traveled paths non-associated with it ? ». 9th European Workshop on Imagery and Cognition, Pavie, Italie.
- PETIT, J.-L. : « Les images du corps : codage cartographique et plasticité ». Colloque de l'ADRM et du Centre G. BACHELARD de Recherches sur l'Imaginaire et la Rationalité : « Les métaphores du corps ». Université de Bourgogne, Dijon.
- PETIT, J.-L. : « A functional neurodynamics for the constitution of the own body ». International Workshop « Body Image and Body Schema. (Neuro)phenomenology, (Neuro)psychoanalysis and Neuroscientific Perspectives ». Université Gent, Belgique.
- RONDI-REIG, L., PETIT, G., TOBIN, C., TONEGAWA, S., MARIANI, J., BERTHOZ, A. : « Le "starmaze" : un nouveau test pour dissocier les stratégies d'orientation spatiale. Analyse comportementale des souris CA1-NR1 "knock-out" », 6<sup>e</sup> Colloque de la société des Neurosciences, Rouen.
- SENOT, P., LESEAC'H, A., PRÉVOST, P. & MCINTYRE, J. : « Comment une trajectoire montante ou descendante influence-t-elle le timing de la réponse motrice dans une tâche de capture de balle en réalité virtuelle », 6<sup>e</sup> Colloque de la société des Neurosciences, Rouen.

— TOFFIN, D., KEMENY, A., REYMOND, G. : « Influence of steering wheel torque feedback in dynamic driving simulator ». Proceedings of the Driving Simulation, Conference North America, Dearborne Michigan, USA.

— TOFFIN, D., KEMENY, A., DROULEZ, J., MCINTYRE, J. : « Transfert Visio-Haptique ». Séminaire Images Virtuelles, CTS (Renault)/LPPA (Collège de France-CNRS), Paris.

— VALLET, M., PAILLE, D., MONOT, A., KEMENY, A. : « Ecological model of glittering texture ». Proc. SPIE Vol. 5007, Santa Clara, pp. 310-320.

#### *Organisations de Réunions*

2002

BERTHOZ, A. :

— École d'été du programme de l'ACI de Neurosciences Intégratives et Computationnelles, Concarneau, août 2002.

GRAF, W. :

— Réunion EUROKINESIS. Collège de France.

ISRAËL, I. :

— Top-down processes in spatial orientation and navigation, symposium 43 (F. Mast, A. Berthoz & I. Israël) of the 3rd Forum of European Neuroscience.

KAPOULA, Z. :

— Organisation de séminaires pour l'atelier de l'oculomotricité, Réseau des Sciences Cognitives Ile de France. Intervenants étrangers, Européens ou Américains (10 séminaires, voir liste au site RISC).

— Atelier « Oculomotricité », Réseau Île de France Sciences Cognitives. Atelier renouvelé en 2002, Co-responsables F. VITU & M.P. BUCCI.

— Organisation des Journées Didactiques « Dyslexie, troubles d'apprentissage et d'attention et problèmes oculomoteurs », avec BUCCI M.P., VITU F., organisé par le Club d'Oculomotricité, Réseau Île de France Sciences Cognitives.

KEMENY, A. :

— DSC2002 « Driving Simulation Conference » : Conférence internationale sur la simulation de conduite, Carré des Sciences, Paris.

— Séminaire : Images Virtuelle, Collège de France, Paris.

WIENER, S.I. :

— Conférence internationale « Brain basis of spatial orientation », Fondation des Treilles.

2003

BERTHOZ, A. :

— Symposium « Autisme, Cerveau et Développement : de la recherche à la pratique », « Bases neurales du regard », Collège de France, Paris.

GRAF, W. :

— European Science Foundation-European Research Conferences (Conference series : Three-Dimensional Sensory and Motor Space : 97-110). IV : Computational Mechanisms for the Generation and Perception of Action in 3D Space. Aquafredda di Maratea. 5-10 avril, 2003.

— Réunion EUROKINESIS. Collège de France.

### *Enseignement*

ARLEO, A. :

— Module de l'École d'été « Lasticité neuronale et adaptation fonctionnelle », organisée par l'ACI Neurosciences Intégratives et Computationnelles, Station de Biologie Marine (Collège de France), Concarneau, France.

— Module de l'École doctorale « Neurosciences comportementales et cognitives », Université de Genève, Suisse.

BERTHOZ, A. :

— DEA de Neurosciences, Paris VI.

— DEA de Sciences Cognitives, EHESS, Paris VI.

BUCCI, M.-P. :

— Responsable de stage pratique aux élèves d'Optométrie, (Orsay, Paris XI).

COUBARD, O. :

— Moniteur de Psychologie expérimentale : méthodologie, perception, mémoire, langage. Univ. Paris V.

— TP d'optométrie. Univ. Paris XI (Orsay).

DROULEZ, J. :

— DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI.

— DEA Neurosciences, Paris VI.

— Magistère de Biologie de l'ENS (option sciences cognitives).

GRAF, W. :

— Animation de stage pour deux étudiants de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse (Traçage transneuronal avec le virus de la rage).

KAPOULA, Z. :

— Maîtrise de Sciences et Techniques d'Optique Physiologique, Optique de Contact et Optométrie, Université de Paris-Sud, Centre Scientifique d'Orsay.

— Diplôme Universitaire des Sciences de la Vision, Université Paris XI.

— Diplôme Universitaire Posture & Vision, Université Paris VI.

LAURENS, J. :

— Enseignement de Statistiques et Informatique en DEUG à Jussieu (monitorat).

RONDI-REIG, L. et ARLEO, A. :

— THIERRY, S., DESS compétences complémentaires en informatique.

— PETIT, G., DEA Biologie du Vieillissement, Université Paris VII « Les dysfonctionnements de la mémoire spatiale : études comportementales et moléculaires chez des souris transgéniques et âgées ».

— DÉGRIS, T., DEA Intelligence Artificielle, « Reconnaissance des Formes et Applications » (IARFA), Université Paris VI.

— DELCASSO S., DEA Sciences Cognitives, Université Paris Sud-Orsay.

McINTYRE, J. :

— DEA de Physiologie et Biomécanique de la Performance Motrice, Option « Biomécanique et Physiologie du Mouvement ».

— École doctorale BMIC et DEA de Neurosciences-Lyon 1 — Organisation Sensorimotrice.

MILLERET, C. (2002-2003) :

— Université Paris VI : Cours magistraux de Maîtrise. Module de Neurosciences des Systèmes Intégrés « Mécanismes neurobiologiques de la perception visuelle ».

— Université Paris XI (Orsay). Maîtrise & Diplôme d'Université d'Optométrie — Cours magistraux portant sur « Les substitutions sensorielles et reconstruction de l'espace chez les aveugles et les malvoyants profonds » et sur « L'organisation anatomo-fonctionnelle du cortex visuel chez les mammifères ».

— Centre hospitalier régional et universitaire de Nantes : cours magistraux dans le cadre du diplôme universitaire de Strabologie (DU) « Le système visuel des Primates » et « Le développement du système visuel ».

— Hôpital des Quinze-Vingts : — Cours magistral dans le cadre du diplôme Interuniversitaire de Posturologie Clinique « Troubles oculomoteurs, corps calleux et posture » — Cours magistral en 3<sup>e</sup> année d'Orthoptie portant sur « Les fondements anatomo-fonctionnels de l'amblyopie strabique ».

PETIT, J.-L. :

— Somatotopie et plasticité : les bases neurales de l'expérience corporelle.

— Journée de Conférences du DEA « Cognition, Développement, Comportement & Cerveau ». Faculté des Lettres, Université de Tours.

WIENER, S.I. :

— Module de l'École d'été « Plasticité neuronale et adaptation fonctionnelle » (organisée par l'ACI Neurosciences Intégratives et Computationnelles), Station de Biologie Marine (Collège de France), Concarneau, France.

*Participation à l'organisation de la recherche*

BERTHOZ, A. :

- Membre du Conseil scientifique de l'École Normale Supérieure.
- Membre du Conseil scientifique du Département des Sciences de la Vie du CNRS.
- Directeur de l'ACI Neurosciences intégratives et computationnelles, Ministère de la Recherche.

DROULEZ, J. :

- Responsable du réseau « Réalité virtuelle », CNRS Département STIC.

GRAF, W. :

- Membre du Comité d'Éthique sur l'Expérimentation chez les Animaux, Île de France-Paris I.
- Rapporteur et expert pour l'évaluation du SFB Tübingen (Deutsche Forschungsgemeinschaft). 19-20 septembre 2002.
- Jury de thèse : Sonia GABEL. Université de Nijmegen. 29 novembre 2002.

McINTYRE, J. :

- Co-responsable de l'atelier « Club Mouvement », Ile de France.
- Comité de pilotage, RTP 15 « Interfaces médiatisées et Réalité Virtuelle ».

MILLERET, C. :

- Membre élu du Comité National des Universités (Section 69) (1998-2003).
- Membre nommé de la Commission de Spécialistes d'Établissement du Collège de France (CSE).
- Membre titulaire représentante de l'Administration du Collège de France aux Commissions paritaires d'établissement (CPE) pour la catégorie B des personnels de recherche et formation.
- Membre cooptée des experts de l'INSERM, 2002-2006.
- Membre expert nommé du jury du Concours Externe CNRS n° 60 BAP A d'accès au corps des Techniciens (juin 2003).

WIENER, S.I. :

- Suppléant de la Commission d'Évaluation des candidats pour les postes d'ATER, Collège de France.
- Membre Conseil d'Établissement du Collège de France.

*Collaboration avec l'Industrie*

DROULEZ, J. :

- Programme d'études de la segmentation de nuages de points 3D en collaboration avec EDF et Mensi.



KAPOULA, Z. :

— Contrat de Recherche du Ministère de la Recherche : Exploration oculomotrice pendant la conduite automobile. PSA Peugeot.

— Contrat d'accompagnement, bourse CIFRE avec PSA PEUGEOT CITROËN (thèse S. Paris-Donnet).

— 2002-03 : Contrat de recherche externe ESSILOR sur « Le contrôle binoculaire moteur chez l'enfant myope ». Co-responsable M.P. BUCCI.

KEMENY, A. DROULEZ, J., BERTHOZ, A. :

— Projet EUREKA CARDS (LPPA avec Renault, Autosim (N), Hydraudyne (NL), Infotron (T), SEOS (UK) et TNO (NL)). Étude d'un simulateur de conduite de recherche avec casque de réalité virtuelle et étude de la coordination visuo-vestibulaire en environnement virtuel.

— Projet VALSID/Predit (LPPA avec Renault, Renault VI et INRETS), Étude d'un simulateur dynamique et de la perception visuelle la nuit en situation de conduite ; ainsi que la perception de distance en convoi de véhicules Poids Lourds.

— Projet EUREKA ULTIMATE (LPPA avec Renault, Hydraudyne (NL) et SEOS (UK), Étude d'un simulateur de recherche grand mouvement à système visuel embarqué (casque ou écran). Étude de la perception du mouvement en situation de conduite.

— Projet CLARESCO (LPPA avec Renault, Autosim (N), Hella (G), Oktal (F), SGI-Trademco (Gr), Sintef (N), TRL (UK), Volvo 3P (F)), Étude de nouvelles technologies d'éclairage et de la perception visuelle à l'aide d'outils de simulation.

LEBOUCHER, P. :

— Contrat Réseau National des Technologies de la Santé (RNTS) du Ministère de la Recherche et de la Technologie. Projet NOIRM : Étude d'un oculomètre nouvelle technologie pour l'IRMf, Collaboration avec la société BEV.

MCINTYRE, J. :

— Développement d'un système opto-inertiel de mesure des mouvements avec la société InterSense (Boston, USA), Charnwood Dynamics (Leicester, UK) et le CNES (Toulouse).

WEXLER, M. :

— Contrat de recherche ESSILOR (2001-2002). Sujet : Mouvement volontaire et involontaire dans la vision spatiale.

*Contrats de recherche et coopérations internationales*

BERTHOZ, A. :

— Co-Directeur Laboratoire Européen « Laboratoire de neurosciences de l'Action » avec la Fondation Santa Lucia à Rome.

— Contrat européen BIBA, « Bayesian Inference for Brains and Artifacts », (2001-2004).

- Contrat « Trajectoires », Action « Cognitive » du Ministère de la Recherche.
- PHRC « Réalité virtuelle et agoraphobie » en coopération avec Espaces civils de Lyon et l'Hôpital Pitié-Salpêtrière.

DROULEZ, J. :

2 contrats de recherche (2002-2003)

- Contrat européen BIBA, « Bayesian Inference for Brains and Artifacts » (2001-2004).

— Contrat « Modèles internes et anticipation sensorimotrice », Programme interdisciplinaire Cognition et Traitement d'Information, CNRS.

— Contrat avec le CNES : « Cadres et référence » et « Modèle interne ».

GRAF, W. :

— Contrat Biotechnology, CEE. Biotechnology research and technological development (Biotechnology 2).

— Coordinateur du programme « EUROKINESIS » CEE — 5<sup>e</sup> PCRD EC-5th FP (QLRT-2001-00151) : Oculomotor function and self-motion perception in the elderly.

GRANTYN, A. :

— Participation au programme européen « Biotechnology research and technological development ». Projet : « Transneuronal tracing reveals modular building blocks of the nervous system », (coordinatrice : Dr. G. UGOLINI, Laboratoire de Génétique des Virus, Gif-sur-Yvette).

ISRAËL, I. :

— Rotation : Expression chorégraphique. Programme Cognitive « Art et Cognition » (2000-2002).

— ISRAËL, I. *et al.* : « Temporal & spatial memory of self-motion in human ». ACI Neurosciences intégratives et computationnelles du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

— ISRAËL, I. MAST, F. (2002) : Perception et estimation du temps pendant le mouvement propre réel et imaginé. Programme d'actions intégrées (Europe) Germaine DE STAËL 2003-2005 (Paris-Zürich).

KAPOULA, Z. :

— Responsable d'une coopération bilatérale entre le CNRS (DRI/PECO) et Université de Technologie de Siauliai, Lituanie.

— Responsable d'une coopération bilatérale entre le CNRS (DRI) et la Grèce (programme PLATON), Pr. EVDOKIMIDIS, Laboratoire d'Electro-Nystagmographie, Clinique Neurologique, Université Nationale d'Athènes. Projet PI.

— 2002-2005 : Contrat Européen Eurokinesis coordonné par W. GRAF « EUROKINESIS ».

McINTYRE, J. :

— « Modèles internes et anticipation sensorimotrice », CNRS : Programme interdisciplinaire cognition et traitement d'information, (2002-2003).

— « Cadres de référence » et « Modèle interne », Contrat CNES (2002-2003).

— Laboratoire Européen de Neurosciences de l'Action avec la Fondation Santa Lucia, Rome.

— Projet VOILA (Visuo-Optical Interactions for Long-term Astronauts), avec le CNES, la NASA et le Center for Space Research, MIT, USA.

— Projet « NeuroCOG », collaboration à bord de la station internationale avec le CNES, l'ESA et l'Université Libre de Bruxelles.

— ACI Cognition et Traitement d'Information : « Modèles internes et anticipation sensorimotrice ».

MILLERET, C. :

— Contrat du programme « Cognitique » du Ministère de la Recherche (2002-2003), avec JOUEN, F. (coordinateur) & VITAL-DURANT, F., EHESS.

— ACI Neurosciences Intégratives et Computationnelles : « Temps et Cerveau ». Pré-projet (2002-2003) avec U.T. EYSEL, Z. KISVARDAY & J. DROULEZ (C. MILLERET : coordinatrice).

— ACI « Programme interdisciplinaire du CNRS » : Cognition et Traitement de l'Information. Projet (2002-2004) avec U.T. EYSEL, Z. KISVARDAY & J. DROULEZ (C. MILLERET : coordinatrice).

RONDI-REIG, L. :

— GIS Longévité, Institut de la Longévité : « Analyse des troubles de l'orientation spatiale au cours du vieillissement ».

WIENER, S.I. :

— Projet Psikharpax « vers la synthèse d'un rat artificiel », programme interdisciplinaire de recherche du CNRS, robotique et entités artificielles — ROBEA au LIP6.

#### *Thèses et Diplômes*

DEA :

BURGUIÈRE, E. (2002), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI.

CAPELLI, A. (2003), DEA Sciences Cognitives, Université Paris XI.

CHAPPUIS, C. (2002), DEA de Neuropsychologie, Université Paris VI.

DOAN, T.B. (2003), DEA de Sciences Cognitives, EHESS.

HERBEZ, O. (2002), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI.

LAURENS, J. (2002), DEA d'Informatique, Université de Marne la Vallée.

LECOQ, C. (2003), DEA UFR-STAPS Paris V.

LE SEAC'H, A. (2003), DEA « Physiologie et Biomécanique de l'homme en mouvement », Université Paris VI.

MORVAN, C. (2002), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI.

PANAGIOTAKI, P. (2002), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris XI.

PREVOSTO, V. (2003), DEA de Neurosciences, Changements de référentiel et organisation dans l'espace des champs récepteurs visuels du cortex pariétal chez le macaque vigile : mécanismes de la représentation de l'espace, Université Paris VI.

VAN BOXTEL, J. (2003), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI.

#### Thèses

PRÉVOST, P. (2002) : Thèse de Physiologie et Biomécanique du Mouvement : « Stratégies d'anticipation du rôle du contexte dans les tâches visuo-motrices », soutenue le 10 décembre 2002, Université Paris XI Orsay. Direction Pr. A. BERTHOZ et J. MCINTYRE.

VIDAL, M. (2002) : Thèse de Sciences Cognitives : « Influence des cadres de référence sur la mémoire spatiale de trajets en trois dimensions », soutenue le 16 décembre 2002, Université Paris VI. Direction Pr. A. BERTHOZ.

KLAM, F. (2003) : Thèse de Neurosciences : « Étude de la représentation de l'espace dans le cortex pariétal à travers l'analyse des signaux neuronaux relatifs au mouvement de la tête : une approche électrophysiologique chez le macaque vigile », soutenue le 4 avril 2003, Université Paris VI. Direction W. GRAF.

MILEA, D. (2003) : Thèse de Neurosciences : « Le lobe frontal dans le contrôle de la motricité oculaire », soutenue le 29 avril 2003, (Collège de France, Pitié-Salpêtrière), Université Paris VI. Direction Pr. A. BERTHOZ et C.P. DESEILLIGNY.

PARIS-DONNET, S. (2003) : Thèse de Psychologie Cognitive : « Contrôle des saccades vers des cibles dans l'espace tridimensionnel : études en laboratoire et en situation naturelle de conduite automobile », soutenue le 12 mai 2003, Université René Descartes, Paris V. Direction Z. KAPOULA.

#### *Distinctions*

A. BERTHOZ : Élection à l'Académie Américaine des Sciences et des Arts.

W. GRAF : Prix Lacassagne du Collège de France.