

Physiologie de la perception et de l'action

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

Regard, Attention et Intention

« Nous percevons d'ordinaire ce que nous pré-percevons » (William James)

Dans le cadre de la physiologie de l'action et du mouvement que nous essayions de construire au fil de ces cours, l'émotion nous est apparue l'an dernier comme un des mécanismes fondamentaux de l'anticipation, de la prédiction, qu'utilise le cerveau projectif pour transformer le monde en un monde possible, pour sélectionner, anticiper, prédire les conséquences des actions en cours en fonction du passé, etc. Nous avons suggéré que, devant l'immense complexité du monde sensible, l'émotion aide le cerveau à guider l'action et contribue au choix entre plusieurs comportements. Il était naturel que nous examinions ensuite les bases neurales de l'attention qui est un autre mécanisme physiologique de sélection. L'attention a donc été, cette année l'objet principal de notre analyse mais j'ai soutenu que les processus attentionnels ne peuvent être étudiés comme s'il s'agissait de mécanismes isolés. J'ai posé comme hypothèse que pour comprendre l'attention il faut aussi comprendre les bases neurales du regard et plus généralement de l'intention et même, comme le disent les philosophes, tenter une analyse physiologique de « l'intentionnalité ». C'est pourquoi le sujet du cours portait sur « regard, attention et intention ». L'attention était ainsi « encadrée » par deux mécanismes clefs des comportements orientés vers un but. Mais l'élaboration d'un examen physiologique de l'attention exigeait d'abord d'en poser les bases théoriques.

Le premier cours a été consacré aux principales théories de l'attention. Ces théories ont tout d'abord suivi un schéma que l'on peut qualifier d'empiriste. En effet Locke, Berkeley et les empiristes pensaient que le cerveau reçoit d'abord des sensations, les combine, puis en abstrait des propriétés générales. L'attention participerait d'après eux à ce schéma de sélection progressive, « bottom-up » dit-on en anglais, des sensations jusqu'aux concepts. Ce schéma est en partie vrai,

mais il faut considérer aussi le chemin inverse « top-down », projectif, de l'intention vers le monde extérieur et plus encore : la relation qui s'établit entre les deux. Husserl, par exemple s'est attaqué aux théories empiristes. Il soutient que nous attribuons « *a priori* » une identité aux choses par des « visées intentionnelles ». Ce ne sont pas les sensations que nous visons mais des objets. Il propose donc de renverser le mécanisme des empiristes, en adoptant le point de vue d'une projection vers le monde, d'une interaction entre le cerveau et le monde, mais avec un acte en visée fondamentale. Nous avons souvent eu l'occasion de soutenir ce point de vue, par exemple dans « Le sens du mouvement » et dans « La décision » publiés aux éditions O. Jacob, et les travaux récents de M. Wexler et l'équipe de J. Droulez dans notre laboratoire sur la perception visuelle de l'espace tri-dimensionnel vont aussi en ce sens. Le cerveau impose au monde ses règles d'analyse. Une de nos hypothèses est que l'attention est contrainte par ces règles, mais en même temps, l'idée de la visée intentionnelle est source de flexibilité. Le point important dans les théories phénoménologiques de Husserl, pour un physiologiste, est qu'elles ouvrent une réflexion sur la pluralité des perceptions possibles. En effet, à partir du moment où on accepte l'idée que c'est le cerveau qui va interroger, porter un regard sur le monde en fonction de ses visées intentionnelles, alors à chaque type d'intention correspond une nouvelle configuration des sensations attendues, à chaque visée intentionnelle correspondra une activité « attentionnelle » différente. L'attention n'est plus seulement un filtre mais une expression de l'intention ancrée dans l'action et l'*Umwelt* (Pour Frege, le même concept s'applique aux contenus de sens des propositions logiques). Ces réflexions doivent beaucoup à ma coopération avec le philosophe J.-L. Petit.

Il serait d'ailleurs possible de faire remonter, comme l'a montré une monographie de Hatfield, la théorisation sur l'attention à Aristote, Lucrèce, Descartes, Spinoza, Bonnet Wolff, etc. Dans un chapitre particulier consacré à l'attention dans son traité de psychologie, William James pose d'emblée le problème dans toute sa dimension, à savoir le problème de l'étroitesse du champ de conscience. (William James, *Précis de psychologie*, Marcel Rivière, 1946, traduction de l'ouvrage de W. James de 1908, N. Textbook of Psychology, Mc Millan). Il écrit : « Nous ne percevons que la minime partie des impressions dont nous assiège constamment toute notre périphérie sensorielle. Jamais leur somme ne pénètre intégralement dans notre expérience, j'entends dans notre expérience consciente, qui se creuse un lit à travers cette multitude comme ferait un petit ruisseau à travers une large prairie émaillée de fleurs. Cependant les impressions physiques affectent nos sens avec une égale énergie. Pourquoi ne perçent-elles pas jusqu'à la conscience ? » (p. 21). La conscience « s'intéresse inégalement aux divers éléments de son contenu, accueille les uns, et rejette les autres : penser, c'est faire des sélections » (p. 220). James revoit le Cogito cartésien. Au lieu de « je pense donc je suis », il propose au fond (la formule est de moi), « je choisis donc je suis ». On voit ici que le problème de l'attention pose aussi un problème philosophique profond : celui de la liberté de penser. James pose d'ailleurs merveilleusement le problème en ayant l'intuition des grands méca-

nismes qui sous-tendent l'attention : a) le groupement perceptif ; b) l'opposition c) la compétition, d) l'élimination. Il propose une théorie hiérarchisée des processus mis en jeux par le cerveau. Contrairement aux théories empiristes, James soumet l'attention au contrôle premier de l'intention. Il écrit : « De toutes les sensations qui ont ainsi obtenu le droit d'entrer, l'attention extrait celles qui méritent qu'on les remarque et supprime toutes les autres. En fait méritent et obtiennent qu'on les remarque celles là seules qui sont le signe d'objets doués d'utilité ou de beauté ». Ici encore le cerveau attribue une identité et une valeur à l'objet perçu d'abord et non pas après la perception. L'important ici est que James a déjà eu l'intuition d'un rôle de mécanismes centrifuges. Un double mouvement est aussi esquissé, d'une part un filtrage et une amplification dans les voies afférentes et d'autre part une pré-spécification venant du cerveau lui-même qui projette sur le monde ses préperceptions. Mais il va plus loin et propose une classification de diverses formes d'attention, l'attention dispersée, sensorielle ou intellectuelle, immédiate, volontaire ou spontanée, divisée, ce qui lui permet de suggérer une combinatoire de processus attentionnels eux-mêmes liés à la signification pour le sujet. Par exemple, il nous rappelle qu'un léger choc sur une vitre n'attirera pas notre attention de la même façon si nous attendons un être aimé un soir de lune, ou si nous craignons l'intrusion d'un voleur. James avait aussi découvert le fait que le maintien de l'attention est un processus dynamique qui nécessite un effort soutenu mais il en comprend aussi le caractère profondément dynamique, comme Helmholtz qui précisait (*Handbuch oder physiologischen Optik*, § 32, 1896, p. 920). « Laissée à elle-même, l'attention ne fait que chercher ici et là de nouveaux objets : sitôt qu'elle a épuisé l'intérêt d'une chose et ne saurait plus en extraire rien de neuf, elle passe à une autre chose, et il n'est pas d'effort de volonté qui puisse l'en empêcher. Si donc l'on veut la maintenir et la fixer sur un seul et même objet, il faut absolument arriver à découvrir sans cesse en cet objet de nouveaux aspects, surtout quand des impressions sensibles plus puissantes viennent la solliciter de s'en distraire. » James a essayé de bâtir aussi une théorie des bases physiologiques de l'attention (p. 296). La première règle qu'il propose est « Pour que l'attention se porte sur un objet et le perçoive intégralement il ne suffit pas qu'il soit présent aux sens, il faut encore qu'il soit présent à l'imagination, c'est-à-dire qu'il soit représenté deux fois » (p. 304). Cette proposition est absolument révolutionnaire et nous verrons qu'il a fallu du temps aux neurophysiologistes pour se dégager d'une théorie de l'attention qui limitait les modèles à une simple facilitation sélective de certains canaux. En cela il rejoint Helmholtz (*op. cit.*, p. 891), qu'il cite d'ailleurs comme quelqu'un pour qui l'imagerie mentale fait partie des domaines qui relèvent de l'étude de l'attention (p. 307). Il appelle IDÉATIONELLE cette forme d'attention. Je conclurais cette étude de James par cette citation : « Nous verrons que tout le drame de la vie volontaire est suspendu à cet usage de l'attention, dont un rien en plus ou en moins détermine la victoire ou la défaite chez des idées qui se disputent l'action » (William James, *Précis de psychologie*, Marcel Rivière, 1946, traduction de l'ouvrage de W. James de 1908, N. Textbook of Psychology, Mc Millan).

Les théories modernes de l'attention

Les premiers modèles des psychologues sur l'attention ont été placés dans une perspective empiriste d'un traitement séquentiel de l'information depuis les sens jusqu'à l'abstraction. Ils sont dus en particulier à Braodbent qui développa la théorie du canal unique : le cerveau est un filtre qui sélectionne les informations. Nous avons passé en revue les théories qui attribuent à l'attention les propriétés suivantes :

- Un filtrage, un goulot d'étranglement (*bottleneck*)
- Une sélection et une inhibition
- Un processus à la fois sériel et parallèle
- Une « préparation à agir » (une posture mentale) (*set* en anglais)
- Lié aux mouvements du regard : La théorie prémotrice de l'attention
- Une activité consciente ou inconsciente
- Dissociable entre deux processus « attentifs » et « pré-attentif »
- Un superviseur (*supervisor* en anglais)
- Une amplification ? (*enhancement* en anglais)
- Un processus ascendant (*bottom-up*) ou descendant (*top-down*).

Puis nous avons examiné les théories qui attribuent à des aires spécifiques du cerveau des fonctions particulières dans les processus attentionnels. Par exemple Mesulam a proposé un modèle des circuits impliqués dans l'attention dans lequel plusieurs régions du cerveau interagissent. Le cortex pariétal postérieur (autour de l'aire PG) contribuerait en établissant une « carte perceptive » interne du monde extérieur. Le cortex cingulaire régulerait la distribution de valence motivationnelle. Le cortex frontal (autour du FEF) coordonnerait les programmes moteurs pour l'exploration visuelle, la saisie. La formation réticulée qui, grâce aux systèmes cholinergiques, adrénérgiques et dopaminérgiques, réglerait le niveau d'éveil. Enfin ces aires canoniques sont aussi en relation avec le cortex orbito-frontal, et le cortex inféro-temporal. Ce réseau est doué de capacité de traitement parallèle et de flexibilité.

Posner (1990) propose l'intervention des mêmes aires que Mesulam mais les régions sont organisées de façon différente. Il y aurait un réseau attentionnel postérieur (cortex pariétal, pulvinar et colliculus supérieur) qui aurait pour fonction principale d'orienter l'attention vers un endroit particulier de l'espace, le cortex pariétal désengagerait l'attention de la cible fixée, le colliculus supérieur déplacerait le « faisceau attentionnel » vers la cible nouvelle d'intérêt et le pulvinar serait aussi impliqué dans la définition de la nouvelle cible. Le réseau antérieur inclut le cortex cingulaire antérieur, l'aire motrice supplémentaire, qui sont activés dans de nombreuses situations impliquant la préparation de l'action et la détection des événements. Un troisième réseau régulerait la vigilance grâce au système noradrénérgique qui, en provenance du *locus coeruleus*, atteindrait le niveau de vigilance du cortex. Pour Posner, le système postérieur serait inconscient alors que la mise en jeu du système antérieur ferait naître la conscience. En effet,

l'attention fait apparaître à la conscience les choses qui en sont l'objet. Pour Posner et Rothblath, le système de vigilance activerait le système postérieur et supprimerait le système antérieur conduisant à un état d'éveil attentif mais libre de contenu conscient ce qu'ils appellent « un effacement de la conscience ».

Ces deux modèles supposent que l'attention est produite par un double processus d'activation des régions du monde visuel sélectionnées et de diminutions de l'activité liée aux régions négligées. Une de leurs limites est de ne pas tenir compte du fait que les champs récepteurs des neurones des régions les plus élevées dans les voies dorsale et ventrale sont extrêmement larges, ce qui est en contradiction avec l'idée d'une focalisation de l'attention sur une petite région du champ visuel. Une autre limite des modèles de Posner, comme celui qu'il a élaboré avec Dehaene, est d'être assez strictement issu d'un concept de filtre successif et ne pas prendre en compte du tout l'aspect projectif de l'attention.

Desimone et Duncan ont proposé récemment un autre modèle dit de « compétition biaisée ». Les neurones impliqués sont l'objet de processus compétitifs entre des effets « bottom-up » qui élargissent progressivement le champ récepteur et des effets « top down » qui le rétrécissent. Ainsi les neurones répondraient à des stimuli dans une région du champ récepteur qui se serait contractée. Leur modèle n'est donc pas celui d'un faisceau attentionnel qui balayerait le champ visuel comme le faisceau d'un projecteur dans un camp de prisonniers ; l'attention résulterait donc d'une compétition. Ce modèle est basé sur trois hypothèses : 1) étant donné notre faible capacité de traitement de plusieurs objets à la fois (canal unique), seulement très peu d'objets peuvent être représentés à la fois (on voit ici que la posture théorique est typiquement empiriste : la faible capacité vient d'un goulot d'étranglement et non d'une visée unifiance) ; 2) la compétition est intégrée dans plusieurs aires cérébrales et un gagnant émerge de la compétition ; 3) toutefois cette victoire est guidée par des processus d'inhibition qui biaisent le choix (on introduit ici les processus « top-down »). Un des problèmes de cette théorie est de savoir comment les différentes populations de neurones impliquées dans la compétition « savent » que l'objet est unique : c'est le problème du lien. Il faut faire remarquer que ce problème est précisément typique des théories empiristes puisqu'elles ne supposent pas que le cerveau *a priori* va chercher dans le monde un objet en fonction de son intention.

Le problème du liage a été abordé par A. Treisman. Sa théorie est connue sous le nom de « théorie de l'intégration des attributs ». Selon cette théorie, des attributs (couleur, forme, mouvement), sont analysés par des processus de bas niveau pré-attentionnels et en parallèle dans toute la scène visuelle. Ce sont les déplacements attentionnels guidés par le sujet et ses intentions qui assurent le liage de toutes ces informations et aident à construire une représentation cohérente. Les attributs présents à un endroit donné deviennent intégrés par référence à une « carte maîtresse de lieux » qui maintient des liens avec la carte des attributs. Le cortex pariétal est supposé être un lieu privilégié de cette intégration. Ce modèle lui confère un rôle essentiel dans le rôle de l'espace et de la localisa-

tion par rapport à d'autres théories qui insistent sur le rôle de l'attention dans la détection des objets. Il est clair que le cortex pariétal est impliqué dans les processus attentionnels non seulement sur la vision mais aussi dans les autres modalités. La discrimination des sons produit une activité importante dans le cortex pariétal inférieur, le cortex pariétal supérieur et le cortex frontal inférieur, dans des conditions d'écoute dichotiques. Ce couple cortex pariétal inférieur et cortex frontal inférieur a été trouvé activé dans d'autres tâches attentionnelles de détection multimodale (vision-audition, vision-tactile, etc.). En particulier la jonction pariéto-temporale a été trouvée activée lors de détection de changement de stimuli indépendamment de la nature des stimuli. Dans une revue récente faisant suite à des travaux d'imagerie N. Kanwhisher et E. Wojciulik ont proposé les conclusions suivantes : 1) l'attention module l'activité aux premiers stades du traitement visuel ; 2) l'attention ne se contente pas de modifier le gain des entrées visuelles mais introduit des activations « top-down » sur le traitement même des données ; 3) l'attention peut, suivant le contexte, influencer le traitement spatial, ou des objets, des attributs, ou une combinaison ; 4) des couples de régions pariéto-frontales produisent des effets descendant de modulation. Ils concluent que « ceci suggère que de nouvelles façons de penser pourraient être exigées pour déterminer comment le système nerveux effectue la ségrégation attentionnelle en des processus distincts ». Je pense qu'effectivement un renversement complet du point de vue sur le rôle et le fonctionnement de l'attention est nécessaire.

Neurophysiologie de l'attention

Les effets de l'attention ont été trouvés très tôt dans les deux grands systèmes visuels : le système dorsal et ventral. Déjà Mountcastle en 1981 avait démontré qu'à la fois l'intensité de la réponse à un stimulus et la taille des champs récepteurs dans le cortex varient en fonction du niveau d'attention. Dans le système ventral, Wurtz montra que les champs récepteurs des neurones du cortex inféro-temporal se regroupent autour d'une cible visuelle. Pour préciser les différences entre les effets de l'attention dans les voies dorsale et temporelle, les chercheurs ont employé des paradigmes qui déplaçaient l'attention mais non les yeux vers des cibles écartées du point de fixation. Curieusement, le fait de diriger l'attention vers un point de l'espace supprimait la réponse des neurones du cortex pariétal à cet endroit mais augmentait la sensibilité dans l'espace qui entoure la cible ; au contraire dans le cortex inféro-temporal la sensibilité des neurones au point de la cible était augmentée. L'attention induit donc des effets très spécifiques dans diverses parties du cerveau qui dépendent des traitements qui sont assurés par chaque partie. On doit à Golberg et Wurtz une des premières expériences qui montra une activation de neurones avant la saccade oculaire vers une cible. Mais c'est dans le colliculus que Mohler et Wurtz montrèrent une activation sélective. Depuis, des activités anticipatrices à une saccade ont été montrées dans le cortex pariétal, le cortex frontal, l'aire extra striée V4. Toutefois l'absence d'activation précoce dans V1 et V2 fit pencher la balance des théories

vers l'idée d'une intervention tardive de l'attention dans les processus visuels. Aujourd'hui des données nouvelles ont conduit à réviser ce point de vue. En effet dans une tâche où le sujet devait discriminer deux barres d'inclinaison différente, les neurones de V1 sont modulés par l'attention. Toutefois il est nécessaire de distinguer entre l'attention « pré focale » qui détecte la présence de barres orientées, par exemple, mais un second processus est constitué de l'attention « focale » pour faire la discrimination. Si on demande à l'animal de détecter un changement dans une série de stimuli orientation ou couleur, on constate une augmentation de sensibilité des neurones qui codent pour le stimulus à détecter, mais ce paradigme est insuffisant et des paradigmes plus complexes ont été construits. Par exemple, on a utilisé la présentation de deux stimuli différents qui se succèdent rapidement. Le sujet devait ne faire attention qu'à l'un des deux et donc ignorer le second.

On retrouve cette idée dans beaucoup d'expériences récentes. Ainsi Moran et Desimone ont proposé que les résultats de leurs expériences avec ces paradigmes suggéraient un modèle de filtrage sélectif avec suppression des informations non pertinentes. Toutefois, une autre interprétation suggère qu'il n'y a pas suppression de l'information mais libération de la zone sélectionnée de la compétition des autres régions autour qui ne sont pas nécessairement supprimées. Cette vue est intéressante car elle lie les processus d'attention avec celui, plus général, de la discrimination des objets dans le monde visuel.

Nous avons ensuite examiné les relations entre attention visuelle et exploration par le regard (« visual search »). Il s'agit d'un champ très large d'étude utilisant l'imagerie cérébrale que nous n'avons fait qu'esquisser. Ces données montrent qu'il existe peut être un double processus : d'une part un mécanisme d'attention basé sur les attributs (couleur, forme, etc.) qui prépare le terrain pour l'attention focale qui elle-même assure l'orientation vers l'objet d'intérêt. En résumé, le processus de traitement de l'information visuelle ne se fait pas de façon seulement sérielle et hiérarchisée, il se fait aussi en parallèle avec de nombreux mécanismes de *feed back* ou de contrôle centrifuge. De plus, des processus de sélection apparaissent à chaque embranchement du processus. L'utilisation des potentiels évoqués permet aujourd'hui de déterminer l'aspect temporel du traitement des signaux dans les différentes aires corticales et de répondre au problème du traitement précoce ou tardif. Nous avons donné quelques exemples d'études utilisant ces techniques. Un exemple est donné par des études sur l'attention sélective à des sons. On présente à des sujets un son dans chaque oreille et on demande au sujet d'ignorer une des deux oreilles. Si on enregistre les potentiels évoqués corticaux induits par les sons, on peut montrer que les ondes précoces (en particulier l'onde N1) sont modulées par l'attention. Woldorff, en 1993, a montré grâce à MEG que la localisation de la modulation du potentiel évoqué était dans l'aire temporelle qui correspond au cortex auditif primaire. Dès la modalité visuelle, Hillyard *et al.*, ont montré que les ondes P1 et N1 sont plus larges lorsque le stimulus est l'objet vers lequel l'attention est dirigée. Les tâches

de recherche visuelle (*visual search*) exigent évidemment des expériences plus complexes et on peut citer par exemple celle de Luck qui suggéra que les mêmes mécanismes sont en jeu dans la localisation spatiale et dans la recherche visuelle. D'autres études en potentiels évoqués ont porté sur le rôle respectif des voies magno- et parvo-cellulaires dans le traitement attentionnel des aspects de couleur ou de forme des cibles visuelles. Ces études concernaient l'aspect centripète de propriétés de traitement sélectif de l'attention. Mais pour répondre à notre intérêt particulier sur l'aspect intentionnel de l'attention, nous avons aussi examiné des travaux portant sur le concept de « patron attentionnel » ou d'attente ou « expectation » produit par le cerveau en fonction de l'intention perceptive. Par exemple, Desimone et Duncan ont assimilé le patron attentionnel avec des mécanismes de la mémoire à court terme. Ainsi, les patrons attentionnels impliqués dans la perception des objets ou des attributs seraient encodés dans le cortex préfrontal ventrolatéral, le cortex inféro-temporal et leurs connections réciproques alors que les patrons spatiaux seraient codés dans la voie dorsale.

Pathologie de l'attention

Nous avons examiné les troubles de l'attention que l'on observe dans un très grand nombre de pathologies du système nerveux central, qu'elles soient dues à des lésions ou à des déficits des grands systèmes neuromodulateurs et plus particulièrement ceux qui apparaissent dans les cas de la maladie d'Alzheimer et des démences précoces, ceux qui atteignent les enfants atteints d'autisme, les patients schizophrènes et surtout les victimes du syndrome complexe des désordres de l'attention (ADHD en anglais). Nous avons aussi examiné comment l'étude des bases neurales de la négligence spatiale peut nous renseigner sur les mécanismes des processus attentionnels. Nous nous sommes particulièrement intéressés aussi aux déficits concernant la capacité d'attribuer des intentions à autrui et ceux qui concernent la reconnaissance des visages dans la mesure où l'identification d'un visage est liée à l'identification des intentions de l'autre et à l'échange. Cet aspect très riche des processus attentionnels est encore très peu compris et fera l'objet d'une partie du cours de l'année 2005.

Ontogenèse des processus attentionnels

L'étude de l'ontogenèse de l'attention est utile pour comprendre ses multiples facettes. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus l'attention met en jeu des mécanismes très automatiques mais aussi des mécanismes très cognitifs. Certains apparaissent très précocement au cours du développement, d'autres se mettent en place plus tardivement. Or le débat sur le calendrier du développement de l'enfant n'est aujourd'hui pas encore clos. Comme l'ont montré les travaux de Mehler par exemple, mais aussi de Mounoud, et récemment de Houdé, les capacités cognitives du bébé sont beaucoup plus précoces que prédites par Piaget. P. Mounoud par exemple suggère qu'il faut renverser la proposition de Piaget :

le développement va de la pensée vers l'action et non pas le contraire (Mounoud 1993, 1994). L'enfant vient au monde avec un premier système représentationnel déjà construit qui explique les capacités exceptionnelles du jeune bébé. Les capacités d'un enfant de 4 ans peuvent être définies en disant que l'enfant active ou inhibe des représentations à volonté, ce qui implique l'importance des mécanismes attentionnels dans le développement de ces compétences comme l'a montré en particulier O. Houdé dans des tâches logico-mathématiques. Si la psychologie moderne révèle le caractère précoce de certains processus attentionnels, en revanche des limites incontournables sont posées par le fait que le développement du cortex frontal et préfrontal, l'essentiel comme nous l'avons vu pour la sélection et la décision perceptive et le guidage de l'action, ne se fait que tardivement dans l'ontogenèse. Mais le problème de l'ontogenèse n'est pas seulement une question de calendrier. Plusieurs théories s'affrontent sur les mécanismes mis en jeu lors de la maturation des fonctions cognitives. Par exemple on peut suggérer qu'une capacité cognitive comme l'attention résulte de la maturation d'une seule région, par exemple le cortex frontal dorsolatéral qui est déterminant dans la capacité de retrouver un objet. Mais la maturation peut résulter du changement dans l'interaction de plusieurs régions. Par exemple l'interaction entre le cortex dorsolatéral frontal, le cortex pariétal et le cervelet donnerait une capacité à identifier et retrouver un objet. Enfin on peut aussi imaginer que le mécanisme essentiel est l'acquisition de nouvelles habiletés par l'apprentissage. Par exemple, l'addition du cortex pariétal inférieur à un réseau donnera une capacité nouvelle pour des tâches visuo-motrices. Ces trois théories ne sont pas exclusives. Le bébé très jeune est capable d'imiter les mimiques faciales de ses parents alors qu'il ne peut voir son propre visage. Meltzoff et Moore suggèrent à partir de cette observation l'existence d'un mécanisme inné de codage et de transfert intermodal entre ce qui est perçu et ce qui est produit. Des résultats obtenus chez le singe fournissent un support physiologique à cette théorie d'un recouvrement des substrats neuronaux qui sous-tendent la perception et l'action. Le caractère précoce de la maturation des fonctions attentionnelles peut être mesuré par l'analyse dynamique de l'activité cérébrale (magnéto-encéphalographie). Par exemple Talon-Baudry et Bertrand ont étudié les capacités de perception visuelle d'un objet chez l'enfant de 8 mois par des méthodes d'analyse des oscillations cérébrales dans la bande « gamma ». On trouve chez l'enfant la même activation dans la bande « gamma » (40Hz) que chez l'adulte, environ 280 m/sec après présentation d'une figure qui peut donner une illusion d'un carré. Cette activité est absente lorsque la figure ne peut pas donner lieu à une illusion. L'intérêt de ces travaux pionniers est d'ouvrir un nouveau champ d'étude dynamique et physiologique de l'ontogenèse de l'attention par des méthodes non invasives.

Une piste très prometteuse dans ce domaine est l'analyse des bases génétiques de l'attention : la génétique de l'attention. En effet si des mécanismes très généraux constituent les bases neurales de l'attention, ils sont susceptibles d'être

profondément influencés par des facteurs génétiques. Ainsi une dimension de physiologie et de psychologie différentielle doit être ajoutée à toutes les autres approches de la question. En effet, des travaux récents révèlent des différences importantes de performances ou de stratégies cognitives entre des groupes de génotypes différents dans une tâche attentionnelle. Le problème de la différence entre les sexes est aussi posé et on peut s'attendre à de nombreux résultats dans les années à venir sur cet axe de recherche de génétique humaine.

Attention et orientation du regard

Une des manifestations les plus visibles du caractère actif de l'attention est l'orientation du regard. Nous avons particulièrement examiné la théorie, due à Rizolatti, qui propose une liaison très forte entre attention et motricité oculaire. Cette « théorie motrice de l'attention » suppose que l'attention dérive de l'activation des mêmes circuits qui traitent les données sensorielles et motrices lors des déplacements du regard. L'attention sélective pour des localisations spatiales résulterait de l'activité de circuits qui programment les mouvements des yeux, de la main et même de la marche vers un but, et autres activités qui exigent une « neurocomputation » spatiale orientée. Nous avons décrit la hiérarchie de mécanismes de contrôle du regard que j'ai proposée dans un article paru il y a quelques années dans la revue *Cognitive Brain Research* et dans le livre *Le sens du mouvement*, en insistant sur le rôle important de l'inhibition qui permet de faire des sélections à divers niveaux hiérarchiques depuis les plus automatiques (neurones pauseurs du tronc cérébral pour la sélection temporelle et colliculus supérieur pour la sélection spatiale et temporelle) jusqu'au plus cognitifs (cascade d'inhibitions des ganglions de la base et du cortex frontal et préfrontal). Des travaux récents sur les mécanismes corticaux de la décision dans la production des saccades oculaires ont été décrits. Ils montrent que la décision de regarder, qui a été aussi discutée dans le dernier cours, est un processus distribué dans de nombreuses aires cérébrales.

Ceci nous a conduit à décrire plus en détail le rôle du cortex préfrontal dans les mécanismes attentionnels. Un des problèmes qui limitent l'usage du regard dans l'étude des processus attentionnel est la quantification des mouvements oculaires. Toutefois, de nouvelles propositions d'analyse des données ont été faites récemment en mesurant la probabilité (*likelihood function*) que le regard d'un observateur soit dirigé vers des cibles d'intérêt (visages), une cible tâche, on montre deux visages à inspecter. Cette analyse donne une mesure intéressante de la préférence.

Attention et émotion

Le guidage de l'action n'est pas seulement induit par des processus cognitifs de type traitement de l'information et, comme nous l'avons étudié l'an dernier,

l'émotion est un guide puissant pour l'action. Mais la question posée ici est de savoir si l'émotion est « superposée » à l'attention ou si elle est « intrinsèque » au processus attentionnels ? Le philosophe Cassirer a posé cette question clairement. Il écrivait : « Une certaine théorie psychologique méconnaît les phénomènes d'expression quand elle les fait naître d'un acte secondaire d'interprétation en les expliquant comme des produits de "l'empathie". Le défaut capital de cette théorie consiste à renverser l'ordre des données phénoménales. Elle doit au préalable ôter la vie à la perception, la convertir en un complexe de simples contenus de l'impression sensible pour ensuite ramener ce "matériau" mort la sensation grâce à la pénétration affective » (E. Cassirer, *Philosophie des formes symboliques. 3. Phénoménologie de la connaissance*, Éd. de Minuit, 1957, 612 p., p. 89). Nous avons étudié particulièrement le rôle de l'amygdale dans les relations entre émotion et attention. L'amygdale est impliquée dans au moins deux fonctions distinctes du point de vue du comportement et de l'anatomie : a) la modulation des réactions d'orientation par l'apprentissage associatif, b) l'accroissement de l'associabilité de certains événements particuliers lorsque des prédictions sur des événements futurs sont violées.

L'associabilité est le lien entre les changements de l'attention et la rapidité d'apprentissage d'un conditionnement à des stimuli. Un circuit est impliqué dans cette fonction. Il implique le noyau central de l'amygdale, les neurones cholinergiques dans le noyau basalis et la substantia innominata, cortex pariétal postérieur, le cortex frontal ainsi que d'autres circuits impliqués dans l'attention (cortex cingulaire antérieur, etc.). Il influence l'apprentissage lorsqu'on modifie la relation entre la valeur prédictive des stimuli et les événements qui surviennent après le stimulus. Ce circuit cholinergique est aussi impliqué dans une variété de processus attentionnels. L'amygdale est impliquée dans la suppression de mouvements d'orientation dans des tâches de conditionnement quand un stimulus nouveau apparaît et qu'il est important pour l'animal. Le noyau central de l'amygdale est impliqué dans l'apprentissage de l'orientation, à un stimulus qui a une signification biologique importante. Le noyau central influence les structures (celles par exemple du striatum qui contrôlent le comportement). Il s'agit d'une influence sur les mécanismes de l'orientation guidée par un BUT (intention) et non pas seulement de l'orientation guidée par un stimulus. Les voies impliquées sont par exemple : l'amygdale, la substance noire et l'innervation du striatum en dopamine qui induisent une modulation de la réponse d'orientation. Les circuits du système limbique influencent aussi la capacité d'attention divisée. Muir *et al.*, ont trouvé que des lésions du circuit qui lie l'amygdale et le « basal forebrain » (noyau basalis et la substantia innominata) ont une influence sur l'attention divisée qui implique aussi le cortex préfrontal médian. On retrouve aussi le cortex cingulaire dans le traitement attentionnel des aspects émotionnels de visages.

Attention et décision

L'attention n'est pas seulement un mécanisme de filtrage sélectif, d'amplification, c'est une véritable fonction cognitive et motrice ancrée dans l'action et qui participe, de plein droit pourrait-on dire, à l'élaboration des décisions concernant l'action. Il était donc naturel d'examiner les relations entre les structures neuronales impliquées dans l'attention et celles où l'on pense que se prennent les décisions sensori-motrices mais aussi la planification de l'action. J'ai traité de ce problème dans le livre « La décision » et nous avons seulement, dans le cadre de ce cours, évoqué quelques paradigmes utiles pour lier les concepts de décision et d'attention. Une tâche utilisée par les physiologistes dans ce but consiste à présenter à un singe une scène très simplifiée composée de 8 cibles disposées en cercle. Elles sont toutes de la même couleur mais une est de couleur différente. En anglais on l'appelle « oddball » « la balle bizarre ». Le singe est entraîné à faire une saccade vers la cible différente ; incongrue, c'est au fond une réaction de détection de nouveauté, de différence, qui est importante dans notre comportement de tous les jours. En enregistrant l'activité dans le cortex frontal (le champ oculomoteur frontal) on remarque que le temps de réaction pour effectuer cette tâche varie beaucoup. Certaines saccades sont précises, d'autres tardives. Les neurones du champ oculomoteur frontal ont une propriété particulière : ils sont actifs pour des saccades dans une direction particulière, ce que l'on appelle le champ moteur du neurone, la zone de l'espace qu'il préfère. On observe que l'activité dans les neurones frontaux augmente lentement avant la saccade. Sans entrer dans le détail de l'analyse, on peut montrer que, suivant que le singe décide de faire une saccade dans la direction de la cible ou non, l'activité du neurone est profondément différente, reflétant le processus de décision. En analysant aussi les latences de la saccade et leur relations avec l'activité neuronale, Schall et ses collaborateurs ont montré que l'activité de ces neurones est un marqueur physiologique des moments où le processus de décision concernant où et quand regarder commence et se termine.

Ces données montrent qu'il est possible de trouver des corrélats neuronaux de la décision mais elles ne donnent pas d'information sur la nature de ces décisions. Par exemple il est intéressant de se demander si des mécanismes différents induisent les décisions concernant où et quand faire une saccade. Ces deux aspects temporel et spatial sont-ils traités séparément ou ensemble ? Glimcher et Sparks ont examiné cette question. Ils ont entraîné des singes à fixer une cible centrale jaune pendant que deux autres cibles verte et rouge étaient éclairées. La cible centrale prenait alors la couleur d'une des deux cibles périphériques et le singe devait faire une saccade dans la direction de la cible correspondante (ayant la même couleur). C'était donc une décision assez simple. On analysait l'activité des neurones du colliculus supérieur avant la saccade pendant la préparation. L'analyse des données montre que le codage de la direction et du moment (le temps) sont séparables.

Un paradigme un peu plus intéressant concernant les décisions prises dans une situation de détection de direction du mouvement d'une scène visuelle a été employé par Newsome. La tâche était la suivante : on présente au singe une scène composée de points en mouvement. Mais dans la scène visuelle les mouvements ne sont pas cohérents. Il y a deux populations de points qui ont des mouvements en sens contraire. Les uns sont en translation vers le haut et les autres vers le bas. Si une grande majorité de points se déplace dans une direction, l'impression que l'on a en regardant cette scène visuelle est dominée par cette population et vice versa. On utilise cette ambiguïté perceptive et la capacité de moduler la certitude de l'impression en demandant au singe de prendre une décision concernant le mouvement de la scène. C'est la fraction de points bougeant dans une direction qui détermine la décision, mais il reste une part d'arbitraire. L'enregistrement de l'activité de neurones a été fait dans l'aire MT qui appartient aux aires visuelles spécialisées dans le traitement du mouvement. Les données révèlent que l'activité dans MT est effectivement liée à la prise de décision par le singe mais ceci ne veut pas dire que la décision est prise dans cette aire.

Un modèle a été proposé par Shalden pour expliquer ce type de processus. Les neurones du cortex pariétal augmentent leur activité pendant la phase de prise de décision comme s'ils sommaient les influences des neurones spécialisés dans la détection des directions vers le haut et vers le bas. La conclusion est aussi que ces structures participent à l'élaboration de la décision. On voit toutefois que la preuve que la décision elle-même est bien prise dans ces aires n'est pas obtenue de façon définitive. Si l'attention est liée à la décision elle dépend aussi de la mémoire des expériences passées.

Nous n'avons qu'effleuré ce grand sujet, comme l'illustre un travail de Carpenter qui a cherché comment une connaissance préalable peut influencer une décision de regarder. Il a été remarqué que les saccades faites dans des directions qui avaient été prévues par une information préalable (amorçage positif) étaient beaucoup plus rapides que les autres dans des tâches de décision. Il est possible d'essayer d'appliquer des modèles empruntés aux économistes pour caractériser ces modifications. Par exemple deux variables étaient considérées par les économistes comme essentielles dans les décisions rationnelles : d'une part le gain attendu et d'autre part la probabilité que ce gain soit obtenu. Platt et Glimcher ont testé ces hypothèses en utilisant le même paradigme que précédemment. Toutefois ils ont manipulé la récompense en variant indépendamment le niveau de récompense (gain) et la probabilité que la récompense soit obtenue, ce qui correspond à une connaissance préalable. Ils ont enregistré des neurones du cortex pariétal chez le singe et ont montré que la fréquence de décharge de ces neurones est proportionnelle aux deux variables décisionnelles. L'analyse des expériences montre que ces neurones sont influencés à la fois par l'information sensorielle et par la connaissance préalable. Cette combinaison est trouvée aussi dans beaucoup de modèles mathématiques de décision.

SÉMINAIRES DU COURS DU PROFESSEUR ALAIN BERTHOZ

— 14 janvier : Pr I. ROBERTSON (Trinity College, Institute of Neuroscience, Dublin), « L'attention : Une porte sur la conscience ? ».

— 21 janvier : Pr H.O. KARNATH (Université de Tübingen, Hôpital Neurologique), « La négligence spatiale, un déficit de l'attention ? ».

— 28 janvier : Dr A. ROUGEUL-BUSER, CNRS (Université Paris VI), « Les rythmes cérébraux de l'attention ».

— 4 février : Pr J. DRIVER (University College London, Institute of Cognitive Neuroscience), « Attention et intégration multisensorielle ».

— 11 février : Pr P. KAHANE (Service de Neurologie, Hôpital Nord Grenoble), « Bases neurales de l'intention du geste chez l'homme ».

— 3 mars : Dr D. BOUSSAOD (ISC, CNRS/Marseille), « Réseaux corticaux de l'attention et de l'intention ».

— 17 mars : Pr B. BIOULAC (CNRS, Faculté de Médecine Bordeaux), « Gestion des conflits dans la planification de l'action et la récompense : rôle du cortex cingulaire ».

TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

1. BASES NEURALES DES MOUVEMENTS D'ORIENTATION :
ÉTUDE MORPHOFONCTIONNELLEMISE EN ÉVIDENCE DE LA RÉTROACTION NÉGATIVE AU NIVEAU DU GÉNÉRATEUR
SACCADIQUE HORIZONTAL PAR LA MICROSTIMULATION DE LA FORMATION RÉTICULÉE
PONTIQUE

A. GRANTYN, R. KATO, M.A. THOMAS (LPPA), A.K. MOSCHOVAKIS,
Y. DALEZIOS (Université de Crète)

Les saccades oculaires sont produites par l'activité concertée des nombreuses populations de neurones à des niveaux différents du système nerveux central. Les circuits dits « pré moteurs » qui exercent l'action excitatrice directe sur les motoneurones sont connus sous le nom de « générateurs saccadiques », l'un pour le composant horizontal, dans la formation réticulée pontique médiane (FRPM), l'autre pour les composantes verticales, dans le mésencéphale. L'activité des générateurs est déclenchée par une « commande du déplacement désiré du regard », provenant principalement du colliculus supérieur. Pour expliquer comment le mouvement est arrêté exactement au moment où le déplacement désiré est accompli, les modèles du système saccadique prévoient une ou plusieurs boucles de la rétroaction négative. Dans les modèles plus anciens (Jürgens *et al.*, 1981) la boucle était postulée au niveau de la FRPM, avec comme substrat les neurones d'intégrateur du déplacement qui exercent l'inhibition sur les neurones phasiques

excitateurs. Malgré l'acceptation très large de cette hypothèse, les neurones qui auraient le pattern de décharge prédit pour un tel intégrateur n'ont pas pu être démontrés. Plus tardivement, l'hypothèse d'une boucle fermée au niveau du CS (Waitzmann *et al.*, 1991 ; Lefèvre et Galiana, 1992) est devenue dominante car bien corroborée par les enregistrements de l'activité neuronale et par des données anatomiques. Initialement, l'existence de la boucle parallèle au niveau pontique n'était pas niée, jusqu'à l'observation paradoxale de l'impossibilité d'évoquer les saccades par la microstimulation électrique de la FRPM chez le singe (Sparks *et al.*, 2002). Les caractéristiques des mouvements évoqués suggéraient que la stimulation au niveau du générateur saccadique n'active pas le mécanisme de leur arrêt automatique par la rétroaction négative.

Dans le cadre de notre travail sur le réseau neuronal contrôlant les mouvements du regard, la question concernant l'existence de la boucle de la rétroaction au niveau du générateur saccadique horizontal devait être clarifiée, en particulier en vue de la modélisation ultérieure. Nous avons utilisé les micro-électrodes capillaires pour un sondage systématique de la calotte pontique médiane chez le chat. En accord avec les résultats de Sparks *et al.*, la stimulation de la FRPM centrale donnait lieu, le plus souvent, aux mouvements dont la vitesse maximale était en dessous de la vitesse des saccades normales. Ils ne s'arrêtaient qu'avec la cessation de la stimulation et leur décours temporel était exponentiel ou linéaire. Occasionnellement la présence d'une saccade au début d'un mouvement évoqué pouvait être supposée prendre en compte le rapport entre la vitesse maximale et l'amplitude (séquence principale). Cependant, il était impossible de déterminer le moment de l'arrêt de ces mouvements rapides, à cause des glissements exponentiels qui persistaient jusqu'à la fin de la stimulation. Le mouvement évoqué ne pouvait donc pas être considéré comme une vraie saccade. Par contre, la stimulation appliquée plus près de la ligne médiane, dans le faisceau prédorsal qui contient les axones descendants du colliculus supérieur, évoquait les saccades normales. Les mouvements combinés — une saccade suivie d'un glissement exponentiel — étaient aussi observés dans cette localisation, mais la vitesse du glissement était faible, permettant l'identification de la fin de la saccade. Nos expériences prouvent l'existence d'une boucle de rétroaction au niveau du pont, car la stimulation directe des axones colliculaires ne peut pas activer la boucle passant par le CS lui-même. La difficulté d'évoquer les saccades à l'intérieur de la FRMP devrait provenir de deux facteurs : 1) inefficacité relative de la stimulation à cause d'une faible densité des neurones du générateur saccadique dans la formation réticulée ; 2) la co-activation des neurones sous-jacents au contrôle des mouvements de la tête. Ces neurones ne sont pas sous contrôle de la boucle locale du générateur saccadique, mais leurs connexions collatérales avec interneurons préoculomoteurs et le noyau abducent (couplage tête-œil) produisent les glissements oculaires qui masquent les saccades ou apparaissent dans leur forme pure.

2. BASES NEURALES DES MOUVEMENTS OCULAIRES ET DES INTERACTIONS VISUO-VESTIBULAIRES CHEZ LE PRIMATE

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

W. GRAF, F. KLAM, V. PRÉVOST (LPPA)

L'étude réalisée porte sur la représentation interne de l'espace perçu, et plus particulièrement sur les réponses neuronales permettant de constituer différentes représentations spatiales. En effet, les travaux sur les patients ayant des lésions pariétales ont conduit à penser que les représentations de l'espace dans le cerveau sont multiples, et directement dépendantes de l'action que l'on veut réaliser. Ces données posent le problème des changements de coordonnées permettant de planifier différentes actions, d'utiliser plusieurs représentations distinctes de l'espace à partir des mêmes informations perceptives. Chez l'animal, une des aires impliquées dans le traitement des informations spatiales (et donc multisensorielles) permettant la formation de ces représentations est l'aire intrapariétale ventrale (VIP). Des résultats récents du laboratoire ont montré que seule une partie des neurones de l'aire VIP ont des champs récepteurs visuels rétinitopiques (i.e. ancrés sur la rétine, se déplaçant avec l'œil), et d'autres ont des champs récepteurs qui semblent être ancrés sur la tête (référentiel craniotopique). Ainsi, afin d'identifier les référentiels utilisés pour la combinaison des différentes entrées sensorielles (visuelles, somatosensorielle, vestibulaire), nous avons choisi d'étudier l'influence de la position de segments corporels (œil et tête) sur les représentations de l'espace, et plus précisément sur la structure spatiale des champs récepteurs visuels de neurones intrapariétaux. En particulier, nous allons démontrer l'existence de champs récepteurs craniotopiques dans VIP, et vérifier s'il existe également des champs récepteurs ancrés sur le corps (référentiel lié au corps). Nous avons réalisé des enregistrements électrophysiologiques dans le sillon intrapariétal, et cartographié les champs récepteurs visuels des neurones (voir Duhamel *et al.*, 1997) pendant le maintien de la fixation du regard par l'animal, avec différentes positions des yeux et de la tête. Pour chaque position de la tête ($n = 3$), plusieurs positions de fixation oculaire ($n = 5$) sont explorées, et le champ récepteur est cartographié dans chaque condition. Ce protocole nous permet d'évaluer l'influence respective de la position des différents effecteurs (les yeux et la tête) sur les propriétés spatiales des champs récepteurs visuels. Nos résultats montrent qu'il existe dans le cortex pariétal des codages dans des référentiels craniotopiques, et également dans des référentiels intermédiaires entre les référentiels rétinitopique et craniotopique. Autrement dit, pour certains neurones, le champ récepteur visuel est modifié à la fois par la position des yeux et celle de la tête. Par ailleurs, on trouve également des activités de champs de gain liés aux yeux, et à la tête : on observe une modulation de l'activité des neurones intrapariétaux en fonction des positions oculaires et de la tête. La

variation de position de ces segments corporels crée une interaction non-linéaire entre les champs de gain et les modifications spatiales des champs récepteurs visuels, ce qui ajoute un degré de complexité supplémentaire aux représentations produites. Enfin, les cartographies réalisées dans le sillon intrapariétal révèlent également la présence de codages craniotopiques dans une aire voisine de VIP, l'aire intrapariétale latérale (LIP) qui est impliquée dans les mouvements de saccades oculaires. Ce résultat est tout à fait nouveau et inattendu pour une aire dont les neurones codent, de façon classique, les représentations spatiales dans un référentiel rétinotopique. L'ensemble de nos résultats, qui démontrent l'existence simultanée de plusieurs référentiels dans le cortex pariétal, liés à différents segments corporels d'une part, et de référentiels intermédiaires d'autre part, n'est qu'une première étape vers une meilleure compréhension des transformations neuronales qui sous-tendent la représentation de l'espace dans le cerveau.

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

3.1. LATENCE DE LA SACCADE ET DE LA VERGENCE CHEZ L'ENFANT DE 7 ANS : EFFET DE L'ATTENTION

M.P. BUCCI, Q. YANG, Z. KAPOULA, N. POUVREAU (LPPA)

Chez quinze enfants sains de 7 ans, nous avons examiné la latence des mouvements oculaires en espace réel (saccade horizontale, vergence et mouvements combinés) en utilisant deux paradigmes oculomoteurs distincts : gap et overlap. Dans le paradigme gap, le point de fixation disparaît avant l'apparition de la cible excentrée vers laquelle la saccade doit être faite. Durant ce temps, l'attention flotte et la fixation oculomotrice est déjà désengagée ; le sujet peut donc programmer plus rapidement la saccade lorsque la cible apparaît. Ces saccades ont une latence courte, d'où le terme d'« express », et semblent être parmi les mouvements des yeux les plus réflexifs. Dans le paradigme overlap, l'apparition de la cible excentrée s'effectue alors que le point de fixation est encore allumé ; après un certain temps, le point de fixation s'éteint et le sujet peut aller fixer la cible. Ce paradigme implique, sans doute, un effort supplémentaire du sujet pour relâcher la fixation et l'attention visuelle (du point de fixation vers la cible en périphérie). Cela expliquerait les latences longues qu'on obtient avec ce paradigme. L'objectif de cette étude est d'examiner la capacité à effectuer des mouvements « express » pour les saccades, et aussi pour les mouvements de vergence et les mouvements combinés.

Les résultats montrent que le paradigme gap, par rapport au paradigme overlap, raccourcit les latences de tous les mouvements oculaires, en particulier pour les saccades et la divergence (pure ou combinée avec une saccade). Le paradigme gap augmente la fréquence des mouvements « express » pour les saccades en vision proche, pour la divergence et pour les saccades combinées avec une divergence ; de façon intéressante, les mouvements anticipatoires (avec des latences

courtes > 80 ms) sont très fréquents (16 %) pour la divergence pure. Ces résultats suggèrent que chez l'enfant de 7 ans, les saccades en vision de près et la divergence peuvent être déclenchées de façon réflexe. Cette étude fait partie du mémoire de Maîtrise de Biologie Cellulaire et de Physiologie de Pouvreau N. et un article a été soumis à *Exp. Brain Res.* (Bucci et coll.).

3.2. CARACTÉRISTIQUES DE SACCADES DURANT LA LECTURE DES MOTS ISOLÉS CHEZ L'ENFANT DE 7 ANS

M.P. BUCCI, Z. KAPOULA ; en collaboration avec F. VITU (LPE, CNRS UMR 8581)

L'objectif de cette étude était d'explorer les caractéristiques des saccades durant une tâche de lecture simplifiée (lecture des mots isolés) chez l'enfant sain de 7 ans (en classe de CP). Plus précisément nous avons comparé la latence et la qualité de la coordination binoculaire des saccades horizontales vers des diodes et vers des mots isolés présentés sur un écran d'un ordinateur. La valeur de la latence est similaire dans les deux tâches. Ceci suggère que les processus impliqués dans la préparation d'une saccade ne dépendent pas des caractéristiques du stimulus. La coordination binoculaire des saccades vers des mots isolés est mauvaise ; en moyenne la dis-conjugaison (la différence de l'amplitude des saccades entre les deux yeux) est du 18 % et elle n'est pas significativement différente de celle observée pour les saccades vers des diodes (16 % de dis-conjugaison). Cette large dis-conjugaison des saccades empêche peut être l'identification correcte du mot à lire, entraînant ainsi une plus longue période de fixation après la saccade pour la lecture du mot en lui-même et sa compréhension. Nous avons aussi observé une large glissade conjuguée aux deux yeux après la saccade vers des mots ; cette glissade conjuguée, dans 67 % des cas, emmène les deux yeux en arrière vers le mot. Ce résultat est en accord avec l'étude de Vitu (2000) montrant que le jeune enfant effectue, plus que l'adulte, des saccades régressives vers le mot ; sans doute, parce que ses stratégies cognitives ne sont pas encore complètement développés.

3.3. CONTRÔLE INIBITEUR DES SACCADES ET DE VERGENCE : ANISOMÉTROPIE SPATIALE O. COUBARD, Z. KAPOULA (LPPA)

D'après une idée originale de Zoï Kapoula, nous avons utilisé une tâche de suppression pour étudier la capacité de sujets normaux à réprimer les mouvements oculaires dans l'espace 3D. Les sujets devaient maintenir le regard sur la position mémorisée du point de fixation original, et dans le même temps ignorer une cible qui pouvait apparaître à droite ou à gauche, vers le bas ou vers le haut, et ce à différentes distances. La cible pouvait également apparaître en avant ou en arrière du point de fixation. Nous avons observé que la capacité de suppression des sujets normaux était imparfaite : les sujets produisaient des mouvements oculaires. Ces erreurs étaient distribuées de façon inégale dans l'espace 3D : les cibles situées dans l'espace proche, vers la gauche et vers le bas étaient

responsables du plus grand nombre d'erreurs. De façon intéressante, des antisaccades spontanées ont été observées systématiquement dans tous les plans de l'espace. Pour les cibles situées en profondeur, nous n'avons pas observé d'antivergence spontanée ; seules les cibles proches ont provoqué des erreurs, qui consistaient en des convergences seulement. Ces résultats suggèrent une anisotropie de l'attention spatiale s'exprimant par une difficulté à ignorer certains espaces plutôt que d'autres.

3.4. VIEILLISSEMENT CHEZ L'HOMME ET SES EFFETS SUR LA VISION ET LA MOTRICITÉ BINOCULAIRE

Q. YANG, Z. KAPOULA ; en coopération avec le Dr C. ORSSAUD (Hôpital Européen Georges Pompidou) et Dr M. SAMSON (Hôpital Gériatrique Henry Dunant)

La motricité oculaire qui contrôle la direction du regard est primordiale pour assurer une vision de qualité et la vision est une fonction primordiale dans les mécanismes d'apprentissage et dans le recueil de données puisque 80 % des informations extérieures reçues passent par ce seul canal. Or, les fonctions visuelles s'affaiblissent avec l'âge et cet affaiblissement de la vision affecte en retour la motricité oculaire et par conséquent le contrôle de la direction du regard. Réciproquement, les mécanismes fins assurant la précision de la motricité oculaire peuvent se détériorer, perturber le contrôle et le guidage du regard et affecter ainsi la vision.

Dans ce contexte du vieillissement, il est important de déterminer comment le sujet âgé guide ses mouvements du regard dans l'espace. Or, il n'existe pas actuellement de données de référence sur cet aspect. Les lenteurs et les imprécisions de l'oculomotricité, en retentissant sur le contrôle de la direction du regard, peuvent être critiques pour l'appréciation du relief et des distances. Ces anomalies oculomotrices perturbent donc la navigation dans l'espace, l'évitement d'obstacles et, à terme, la sécurité de la personne âgée. Elles peuvent être l'un des facteurs de chute, pathologie fréquente à cet âge et dont la gravité humaine, sociale et économique est majeure. L'équipe a entrepris cette année une opération de recherche de grande envergure visant à répondre à ces questions de santé publique importantes compte tenu du vieillissement de la population et pour lesquelles il n'existe toujours pas de données fiables tant au plan national qu'international. Le pilier de cette opération est le Dr Yang Q., neurologue, chercheur contractuel du CNRS. Cette opération se déroule en parallèle en laboratoire, où nous étudions des sujets âgés bien portant entre 59 et 75 ans, d'autre part, des sujets plus âgés et moins bien portant en particulier des sujets ayant des antécédents de chutes non explicables. Cette opération de recherche est soutenue au plan européen par le contrat EUROKINÉSIS dont l'organisateur est W. Graf, et par un contrat national CNRS CTI/Handicap nous permettant de coopérer avec l'équipe Cognition et Motricité de STAPS, Université Paris V. De nombreux étudiants ont joint cette opération de recherche cette année et contribué grande-

ment. Ce sont, par ordre alphabétique, Émilie DEBAY optométriste, DESS Analyse de la Vision (Aix-Marseille, St Jérôme), Lena FERRUFINO DEA de Physiologie et Biomécanique de l'homme en mouvement (Université Paris V) et Nathalie POUVREAU DEA de Biologie du Vieillissement (Université Paris V-VII). Les résultats préliminaires suggèrent une dégradation de tous les paramètres des mouvements des yeux chez la personne âgée, le phénomène étant d'avantage marqué chez les chuteurs. Il semblerait également que les conséquences du vieillissement soit exacerbées à certaines distances (ex. loin pour les saccades). Des différents sous-circuits corticaux et sous-corticaux sous-tendent les différents types des mouvements des yeux. Les altérations avec l'âge peuvent être aussi différentes.

3.4.1. EFFET DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE DU CORTEX PARIÉTAL DROIT SUR LA LATENCE DE LA SACCADE ET DE LA VERGENCE

Q. YANG, Z. KAPOULA avec la participation de O. COUBARD, G. DAUNYS et du Dr C. 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 employée 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 notre étude, nous avons appliqué une stimulation 80, 90 ou 100 ms après l'apparition d'une cible vers laquelle le sujet devait faire soit une saccade latérale, soit une vergence (convergence ou divergence), soit les deux (mouvements combinés). Cette étude démontre pour la première fois que la stimulation magnétique transcrânienne du cortex pariétal droit provoque un prolongement de la latence de tous les mouvements horizontaux dans l'espace 3D (saccades à droit ou à gauche, vergence et mouvements combinés). Le prolongement résulte, sans doute, de l'interférence avec le signal du désengagement de la fixation oculomotrice. Pour les mouvements combinés l'effet est similaire pour la saccade et la vergence ; la corrélation étroite entre la latence de deux composantes n'a pas été modifiée par la stimulation. Ces observations sont compatibles avec un modèle selon lequel le mécanisme de décision est commun pour l'initiation du mouvement combiné en direction et en profondeur. Ce travail a fait l'objet d'un article à *Neuroscience Letters* (Kapoula et coll.).

3.4.2. INFLUENCE CONTEXTUELLE DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE SUR LA LATENCE DE LA SACCADE ET DE LA VERGENCE

Z. KAPOULA, Q. YANG (LPPA)

Le cortex pariétal droit a été stimulé quelque ms après l'apparition de la cible qui demandait soit une saccade soit une vergence soit un mouvement combiné.

Des paradigmes expérimentaux en blocks purs et en blocks mixtes ont été employés. Le résultat essentiel est qu'en condition de blocks mixtes dans les essais sans stimulation magnétique transcrânienne, la latence des mouvements, en particulier celle de la divergence, augmente significativement par rapport à la latence dans des conditions des blocks purs. Il s'agit donc d'une influence contextuelle de la stimulation Magnétique Transcrânienne qui mérite d'être prise en considération pour des expérimentations futures sur ces mouvements. Par ailleurs, pour la divergence, la prolongation de la latence par la SMT était influencée par le nombre d'essais avec SMT dans les blocks expérimentaux. Nous proposons que le processus de désengagement de l'attention visuelle et son déplacement vers la cible se fait plus rapidement. Au plan théorique, cette étude démontre une grande influence contextuelle pour la divergence, qui souvent a la latence la plus courte par rapport aux autres mouvements (saccades, convergence, mouvements combinés).

3.4.3. EFFET DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE DU CORTEX
PARIÉTAL GAUCHE SUR LA LATENCE DE LA SACCADE ET DE LA VERGENCE
Q. YANG, Z. KAPOULA (LPPA)

Cette étude centrée sur le cortex pariétal gauche examine pour la première fois son rôle dans les mouvements de vergence et les mouvements combinés. Les résultats sont d'un grand intérêt théorique car on démontre que la stimulation du cortex pariétal gauche prolonge la latence des saccades vers la droite (controlatérale à la stimulation) et de la convergence, alors qu'elle n'a aucun effet sur la latence des saccades à gauche et de la divergence. Pour les mouvements combinés, l'effet de la SMT est également spécifique : prolongation de la latence seulement pour les saccades à droite combinées avec une convergence. Peut-être le cortex pariétal gauche participe-t-il à l'initiation du mouvement via une activité topographique décrivant l'emplacement de la cible — « *where* », « *où* » signal. Cette interprétation est compatible avec le modèle de Findlay & Walker (1999), et suggère, pour la première fois, que le cortex pariétal gauche et le cortex pariétal droit participent à l'initiation des mouvements par deux mécanismes différents l'un concernant le « *où* », l'autre le « *quand* ».

3.4.4. EFFET DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE
DU CORTEX PARIÉTAL DROIT SUR LA LATENCE DES SACCADES VERTICALES
A. TZELEPI, Q. YANG, Z. KAPOULA (LPPA)

Il existe des asymétries des latences haut-bas surtout si on utilise le paradigme « gap » (disparition du point de fixation avant l'apparition de la cible), les latences des saccades vers le bas sont plus longues. Pour la première fois, nous démontrons que le cortex pariétal droit est impliqué à l'initiation de la saccade verticale. Toutefois, la SMT du cortex pariétal droit prolonge la latence des saccades verticales seulement dans le paradigme dit « delayed » (où la diode de fixation reste allumée pendant la présentation de la cible). Ce paradigme

déclenche des saccades plus volontaires. L'effet ralentissant de la SMT est plus important pour les saccades vers le bas. Les mécanismes hypothétiques d'attention spatiale (modulée par le paradigme, gap ou delayed) et du désengagement de la fixation oculomotrice s'articulent, sans doute, différemment pour la saccade vers le haut et pour la saccade vers le bas.

3.4.5. CONTRÔLE OCULOMOTEUR INHIBITEUR ET RÔLE DU CORTEX PRÉFRONTAL :
ÉTUDE PAR STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE
O. COUBARD, Z. KAPOULA (LPPA)

La suppression des mouvements oculaires implique une cascade de mécanismes inhibiteurs aux niveaux cortical et sous-cortical. Nous avons focalisé notre attention sur le rôle du cortex préfrontal (CPF) dans le contrôle inhibiteur de la saccade et de la vergence. Dans un travail préalable, nous avons confirmé que la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) du CPF droit favorisait l'émergence de saccades automatiques controlatérales. Par ailleurs, nous avons montré que la SMT du CPF droit pouvait réduire la latence de la convergence, mais uniquement lorsque cette dernière était combinée à une saccade vers la gauche ou vers la droite. Nos recherches actuelles portent sur l'investigation, au moyen de la SMT, du rôle des cortex préfrontaux droite et gauche dans le déclenchement des mouvements de convergence mais aussi de divergence.

3.5. ÉTUDES PAR MAGNÉTO-ENCÉPHALOGRAPHIE : ASYMÉTRIE VISUO-MOTRICE
HAUT-BAS ET LIEN AVEC LA DISTANCE ET LA VERGENCE
A. TZELEPI, Z. KAPOULA (Centre EEG/MEG Hôpital de la Salpêtrière)

A. Tzelepi (post-doctorant CEE) a achevé des expériences sur l'asymétrie visuo-spatiale haut-bas et son substrat cortical qu'elle a entrepris avec nous depuis 2002. Des études préalables par MEG ou EEG étudiant les potentiels visuels évoqués montrent une activation plus importante du cortex occipital pour des stimuli visuels présentés dans le champ visuel bas (Portin et coll., 1999). Nombre d'autres études venant de différents champs de recherche suggèrent une spécialisation différentielle entre le champ visuel haut et le champ visuel bas pour l'homme. Il existe des revues sur ce sujet (Skrandries, 1991 ; Previc, 1990) qui attribuent l'origine de cette spécialisation à une adaptation du système visuel humain à l'environnement dans lequel nous vivons. L'hypothèse générale est que le traitement de l'information et l'action visuo-motrice dans le champ visuel haut sont liés à des tâches dans l'espace visuel lointain et extra-personnel (Tzelepi et coll., 2004). L'objectif du projet entrepris par A. Tzelepi est la mise en évidence au moyen de la magnéto-encéphalographie et électro-encéphalographie de la séquence temporelle précise (ms) des activations corticales et de la localisation de ces activations à la surface du scalp ; la tâche utilisée est une tâche des saccades verticales et horizontales étudiées à des distances différentes, donc à des angles de vergence différents. Ces paradigmes originaux mettent en œuvre soit le système des mouvements des yeux naturellement couplé avec le mouve-

ment de l'attention, soit les déplacements de l'attention visuelle sans mouvements des yeux ; A. Tzelepi avec l'équipe du centre MEG/EEG a réalisé ces expériences et l'analyse et exploitation des données sont en cours.

3.6. MÉMOIRE SPATIALE 3D ÉTUDIÉE PAR DES SACCADÉS ET DES VERGENCES : APPORT DE LA MAGNÉTO-ENCÉPHALOGRAPHIE

Q. YANG, Z. KAPOULA, stagiaire A. TEISSIER (Maîtrise de Biologie Cellulaire et Physiologie, ENS, Cachan)

L'EEG a une résolution temporelle excellente pour l'étude de l'activation corticale et son évolution au cours de la tâche. Des nombreux travaux ont montré des patterns d'activation différente pour les saccades oculaires dans des conditions différentes (saccades guidées visuellement, saccades guidées par la mémoire, ou anti-saccades). Par exemple, Everling et coll. (1998) ont montré que l'exécution d'une anti-saccade est précédée par une activation du cortex pariétal contralatéral à la cible suivie d'une activation pariétale ipsilatérale. Evdokimidis et coll. (2001) ont montré une augmentation de l'activation frontale-centrale par rapport à l'activation postérieure pariétale qui survient pendant la période de mémorisation (500-1 000 ms) après le flash d'une cible vers laquelle le sujet exécutera une saccade guidée par mémoire. Pendant la période juste avant le déclenchement de la saccade l'activation est surtout postérieure pariétale. Des études par EEG de la vergence sont plutôt rares, à notre connaissance, se limitent à celles de l'équipe. Ainsi, Kapoula et coll. (2002) et puis Tzelepi et coll. (2004) ont montré une activation centrale postérieure avant le déclenchement de tous les mouvements, qui est plus marquée pour la vergence que pour les saccades ou les mouvements combinés. Nous examinerons le pattern d'activation pour des saccades et de la vergence (isolées ou combinées) guidées par la mémoire. Au centre EEG/MEG Salpêtrière, nous effectuerons ces études surtout avec MEG et quelques expériences contrôle par EEG. La MEG permet d'enregistrer rapidement l'activité du cortex entier, a une très bonne résolution temporelle et permet de localiser la source des réponses évoquées. Une première étude est en cours et concerne les mouvements guidés par la mémoire dans l'espace 3D. À chaque essai la cible apparaît brièvement à gauche ou à droite, en avant ou en arrière du point de fixation. Le sujet, dans le noir complet, il doit faire un mouvement vers la cible mémorisée. On étudie l'activation corticale pendant la période d'apparition de la cible (période de localisation), pendant la période de mémorisation et pendant la période de la préparation du mouvement. L'activation de mémorisation est-elle différente selon l'emplacement de la cible dans l'espace ?

3.7. EXPLORATION OCULOMOTRICE DES ŒUVRES DE FRANCIS BACON :

UNE ÉTUDE SUR SITE AU MUSÉE MAILLOL, Paris, mai-juin 2004

Z. KAPOULA, L.-J. LESTOCART, E. KUZUCOGLU (Institut d'Informatique d'Entreprise, CNAM)

Depuis plus d'un siècle les chercheurs fascinés par la manière dont le regard explore les œuvres d'art ont développé des méthodes d'enregistrement des mouvements des yeux, parfois rudimentaires, pour capter et élucider les intrications de ce dialogue silencieux par le regard entre l'œuvre et le spectateur. Yarbus en Russie et Buswell aux USA étaient les deux grands précurseurs de ce domaine. Yarbus, mettait en évidence certains grands principes. Le cerveau ne peut analyser l'image que quand l'œil est en pause (la fixation après chaque mouvement) car pendant, l'image traverse la rétine avec une grande vitesse supprimant la vision. Mais l'œil fixe de façon sélective les endroits les plus saillants de l'image explorée. S'agit d'une saillance visuelle, sémantique ou les deux, cela reste un sujet débattu. L'œil se dirige presque immédiatement vers ces points saillants. Et très vite il se met à faire et refaire des boucles en retournant vers ces mêmes points. Après combien de temps ces boucles de retour émergent ? À quoi servent-elles ? S'agit-il peut être d'une stratégie motrice servant à encren l'image dans le cerveau et sa mémoire comme un parcours moteur ? La toile est physiquement bidimensionnelle (horizontale, verticale) mais son contenu invite l'observateur à naviguer mentalement dans un monde tridimensionnel. Ce parcours mental se manifeste-t-il sur le parcours du regard ? Voici quelques grandes questions auxquelles l'étude de l'exploration des œuvres d'art vise à répondre. Les œuvres d'art constituent un moyen privilégié de l'expression et de communication et amènent les questions physiologiques sur un autre plan, celui de l'esthétique. L'œuvre de Francis Bacon est unique à étudier dans cette dialectique physiologie et esthétique. Bacon, est metteur en scène, architecte employant des nombreux procédés astucieux et riches pour isoler la figure de la structure et du cadre. Le conservateur du Musée Maillol, M. Lorquin, nous a accueillis et permis de faire cette étude directement en site, avec l'observateur explorant les tableaux exposés actuellement. Notre appareil d'enregistrement des mouvements des yeux par caméra vidéo rapide (Chronos, Vision) a été transporté au musée. M. Eherette a réalisé un dispositif spécifique créé pour enregistrer le regard du spectateur debout devant le tableau et pour couvrir le tableau afin de capter l'endroit où se dirige la toute première fixation du regard lorsque l'on couvre le tableau. Cela est une nouveauté, car les études dans ce domaine portent toutes sur l'exploration des reproductions des œuvres d'art. Or, l'œuvre et sa reproduction n'évoquent pas les mêmes sensations et peut être pas le même parcours d'exploration.

En laboratoire, au Collège de France, nous développons une série d'algorithmes, commerciaux et algorithmes nous permettant d'analyser l'exploration oculomotrice. Certains de ces logiciels sont réalisés par le Pr G. Daunys, Université de Technologie, Siauliai, Lituanie. Evren Kuzucoglu, ingénieur stagiaire,

développe actuellement d'autres algorithmes permettant de visualiser en temps différé le parcours d'exploration du regard.

4. PROCESSUS DE CONTRÔLE POUR LA COORDINATION VISUO-MOTRICE

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

J. McINTYRE, L. DAMM, A. LESEACH, P. PRÉVOST, P. SENOT ; en collaboration avec A. BERTHOZ (LPPA), F. LACQUANITI et M. ZAGO (Institut Scientifique Santa Lucia, Rome), C. OMAN, A. LIU, L. YOUNG (Massachusetts Institute of Technology)

La capacité à prévoir la trajectoire d'un objet dans l'espace tridimensionnel de manière à l'attraper implique l'existence de « modèles internes » qui représentent notre connaissance des lois physiques de mouvement dans le système nerveux. L'effet de la gravité est inclus dans ces modèles tant qu'elle impose une accélération constante sur les masses. Nos études portent sur les questions suivantes : quand nous attrapons des objets, le système nerveux central peut-il estimer le temps de contact en utilisant des estimations visuelles de l'accélération, ou en faisant une supposition *a priori* sur la direction de l'accélération gravitationnelle ? Dans quel repère s'effectue l'estimation de la trajectoire ? Quelles informations interviennent dans l'estimation de l'énergie de l'impact entre l'objet et la main ? Nous avons étudié l'adaptation de ces modèles internes au sol et en microgravité avec une tâche de saisie d'une balle en phase balistique. Le cerveau utilise-t-il une estimation de TTC (time-to-contact) de premier ordre (vitesse constante) ou de deuxième ordre (accélération constante) ? Une modélisation des stratégies prédictives montre une légère différence entre une estimation de TTC de premier ou de deuxième ordre appliquées au sol, mais une forte différence entre ces deux hypothèses pour la capture d'une balle en micropesanteur. Nous avons ainsi montré que le SNC emploie un modèle interne de la gravité lors de la capture d'une balle en chute libre, grâce aux expériences menées en vol spatial. Nous avons aussi testé la capacité d'attraper des objets mus avec des accélérations variables. Les résultats sont compatibles avec une estimation de TTC de premier ordre pour les accélérations non prévisibles, telle que l'accélération d'un pendule. Les expériences en réalité virtuelle (RV) confirment que, lorsqu'il s'agit d'un objet apparemment en chute libre, les sujets répondent plus tôt quand l'objet tombe d'en haut et plus tard quand l'objet monte d'en bas. Des simulations des stratégies de contrôle montrent comment, en absence de la possibilité de percevoir directement l'accélération de l'objet, le sujet peut optimiser ces performances en ajustant son *a priori* de celle-ci. L'ensemble de ces résultats nous amène à notre hypothèse actuelle : le SNC doit se contenter des stratégies de premier ordre — sans perception en temps réel de l'accélération — pour les tâches d'anticipation lorsque que la dynamique de l'objet est inconnue. Cependant la performance peut être améliorée avec une estimation *a priori* de l'accélération quand un

modèle interne de la dynamique du mouvement est disponible. Dans une tâche d'interception plus générale, la main doit aussi être déplacée au bon endroit afin d'attraper l'objet. On peut envisager deux stratégies pour diriger la main : soit essayer d'ajuster la vitesse de la main à celle de l'objet (contrôle prospectif), soit essayer de prévoir l'endroit où se trouvera l'objet à un moment donné et transporter la main à cet endroit pour l'y attraper (contrôle prédictif). Dans leurs expériences de capture des objets en mouvement avec les robots, Slotine et coll. ont montré qu'en intégrant un algorithme initial du mouvement (parabole), un estimateur d'erreur et un filtre adéquat, il est possible de faire attraper un objet à un robot. La stratégie consiste à réduire le nombre de degrés de liberté de la tâche à un seul : la vitesse de la pince du robot est ajustée à celle de l'objet volant vers celui-ci. L'objet est ainsi immobile dans un repère local et l'interception est facilitée. Nous allons comparer le comportement chez l'homme avec la performance de ces robots artificiels afin d'identifier la stratégie adopter par les êtres humains lors d'une tâche d'inteception.

4.2. CONTRÔLE DE LA FORCE ET DE L'IMPÉDANCE

En collaboration avec J. DROULEZ (LPPA), D. TOFFIN (CTS Renault)

Un grand nombre de tâches manuelles implique une force de contact entre la main et un objet dans l'environnement. Le système nerveux a la capacité de mesurer et de contrôler les efforts produits par les segments corporels. Il faut cependant déterminer quelles sont les informations kinesthésiques et proprioceptives qui exercent une influence sur la perception des forces produites par la main et sur la perception des formes par exploration haptique, ainsi que le rôle de cette perception sur le contrôle des gestes manuels. Il existe actuellement deux hypothèses sur la perception des forces haptiques : celle de la mesure directe de la force par les capteurs de pression de la peau et celle du sens de l'effort musculaire qui déterminerait notre perception de la force produite. L'idée de programmer la force produite par la main en terme d'effort requis, et non en terme de force propre, implique une forte interaction entre les propriétés mécaniques du bras et la force effectivement exercée sur l'environnement. En effet, si on déplace la main d'un sujet humain dans toutes les directions et qu'on mesure la force de réaction, on trouve que l'impédance effective de la main est plus raide dans les directions radiales (par rapport à l'épaule) et moins raide (plus souple) dans les directions transversales. Ceci est une conséquence directe des propriétés élastiques des muscles, de leur géométrie par rapport aux os et aux articulations du bras et des propriétés physiologiques des circuits de réflexes spinaux. Quand nous demandons à un sujet de sentir une force appliquée par un joystick motorisé puis de reproduire la même force contre une contrainte rigide, la force reproduite dévie d'une manière systématique selon l'orientation de l'anisotropie de la raideur de la main. La raideur du joystick peut aussi avoir une forte influence sur la réponse du sujet. Nous en concluons que le sujet spécifie et mémorise une force comme un « effort » exercé dans une certaine direction

plutôt qu'un véritable vecteur de force. Résultat : quand le sujet reproduit le même effort, la force n'est pas toujours dans la même direction.

4.3. RÉFÉRENTIELS GRAVITAIRES POUR LA COORDINATION VISUO-MOTRICE

En collaboration avec M. LIPSHITS (Russian Academy of Science)

Le SNC humain peut identifier la direction et l'intensité de la gravité par plusieurs moyens : les indices visuels (murs, sources de lumière, etc.) les otolithes du système vestibulaire, l'effet du poids des segments corporels sur la proprioception. L'axe vertical, défini à la fois par l'action de la gravité sur le corps et par des indices visuels, pourrait servir à aligner les différents systèmes de coordonnées utilisés par le SNC. En effet, les sujets humains sont plus aptes à identifier la direction d'un stimulus horizontal ou vertical qu'à préciser la direction dans un sens oblique. Nous avons étudié ce phénomène avec le manche à retour d'effort ROBOTOP et le poste expérimental COGNILAB développé pour l'étude des processus cognitifs en apesanteur. Pour la comparaison de deux traits présentés l'un après l'autre sur un écran vidéo, et pour la comparaison d'un stimulus haptique avec un stimulus visuel, les sujets semblent utiliser un référentiel lié à la fois à l'axe du corps et à la direction de la gravité. Ceci est mis en évidence par la modification des patrons de réponse évoqués par l'inclinaison du corps du sujet lors de l'expérience. Plus précisément, un effet de l'oblique est évident dans la variabilité des réponses lorsque le sujet reste debout par rapport à la gravité (les réponses sont moins variables pour les stimuli alignés avec les axes horizontal et vertical que pour les axes obliques). Cependant quand l'axe du corps du sujet est incliné par rapport à la gravité, cet effet de l'oblique disparaissait. Néanmoins, lorsque les sujets ont effectué cette tâche en impesanteur, l'effet d'oblique observé au sol s'est maintenu dans leurs réponses, même quand ils flottaient librement dans l'espace intérieure de la station. Il semble donc que le SNC peut utiliser uniquement un repère égocentré quand les informations gravito-inertielles et des référentiels haptiques manquent.

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

C. MILLERET, N. ROCHEFORT, L. FOUBERT, E. BUI QUOC, N. QUENECH'DU ;
en collaboration avec U.T. EYSEL, Z. KISVARDAY, P. BUZAS (Institut für
Physiologie, Universität de Bochum, Allemagne), J. DROULEZ (LPPA) et
D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

Au cours de l'année qui vient de s'écouler, nous avons poursuivi notre étude de l'intégration interhémisphérique visuelle, chez l'adulte et au cours du développement, en combinant trois disciplines différentes : les « Neurosciences Intégratives », les « Neurosciences Computationnelles », et « l'Ophtalmologie ». Nous avons aussi utilisé différentes approches : l'imagerie optique (technique innovante), l'anatomie, l'électrophysiologie et la simulation par ordinateur. 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), mais également du chat adulte élevé soit avec une *vision monoculaire* (groupe MD) ou un *strabisme unilatéral* (groupe CV).

5.1. 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)

L'étude des caractéristiques spatiales des cartes corticales calleuses visuelles primaires du chat adulte normal par imagerie optique (système ORA 2001) a été poursuivie. Ce système, qui correspond à une technique innovante, est maintenant acquis par l'équipe. Il est en cours d'implantation dans notre poste expérimental sous la version « 3001/D » et sera de ce fait capable de fournir des données très précises à la fois dans les domaines spatiaux et temporeux (100 μm ; ~ 1 ms) dans un futur proche. En utilisant des stimuli visuels appropriés (générés par ordinateur), les limites, l'organisation rétinotopique et les propriétés spatiales de ces cartes corticales calleuses sont étudiées aussi précisément que possible. 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 sont donc analysés, tant dans la zone efférente que la zone de terminaisons. Ces données « spatiales », qui correspondent 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.

5.2. 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 (également commencée l'année dernière) 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 consiste 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 collabora-

teurs (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 le logiciel de simulation *Neuron* (plus performant que le précédent), nous avons d'abord confirmé ces résultats chez les adultes normaux. Nous avons en outre démontré qu'une *occlusion monoculaire précoce* ne modifiait pas significativement cette synchronie à l'âge adulte, malgré de fortes anomalies dans le développement des axones calleux du fait de l'occlusion. 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.

5.3. RECHERCHE D'UNE ASYMÉTRIE DE L'INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE VISUELLE VIA LE CORPS CALLEUX CHEZ LE MAMMIFERE SUPERIEUR AMBLYOPE PAR STRABISME CONVERGENT UNILATERAL

E. BUI QUOC, N. QUENECH'DU, C. MILLERET (LPPA)

Cette étude anatomo-fonctionnelle de l'intégration interhémisphérique visuelle chez le mammifère supérieur amblyope par strabisme convergent unilatéral permet à l'équipe d'établir un nouveau pont interdisciplinaire : cette fois entre les Neurosciences Intégratives et l'Ophthalmologie. E. Bui Quoc est en effet ophtalmologiste et vient de rejoindre notre groupe.

D'après certaines études anatomiques antérieures, il avait été suggéré une asymétrie des connexions calleuses entre les deux hémisphères chez des animaux adultes dont un œil avait été dévié immédiatement après la naissance (Lund and Mitchell, 1978 ; Lund *et al.*, 1979) : (i) de l'hémisphère ipsilatéral à l'œil normal vers l'hémisphère ipsilatéral à l'œil dévié, il y aurait une stabilisation massive d'exubérances juvéniles calleuses dans les aires visuelles corticales primaires 17 et 18 ; (ii) de l'hémisphère ipsilatéral à l'œil dévié vers l'hémisphère non dévié, il n'y aurait au contraire une connectivité normale (avec des terminaisons calleuses surtout localisées à la bordure 17/18). Une étude récente dans notre groupe (Milleret and Houzel, 2001) a confirmé fonctionnellement la première hypothèse. Lors de l'année qui vient de s'écouler, globalement, nous avons confirmé la seconde hypothèse. Nous démontrons toutefois l'existence de caractéristiques fonctionnelles anormales de l'intégration interhémisphérique visuelle dans cette seconde condition, ce qui n'avait pas été reporté par les études anatomiques. Par cette étude, nous abordons plusieurs problèmes fondamentaux incluant : (i) les bases neurales de l'amblyopie strabique : mieux les connaître permettra d'en améliorer les traitements ; (ii) l'asymétrie cérébrale ; (iii) le rôle de l'activité (synchronisée ou non) dans la mise en place des connexions nerveuses au cours du développement.

6. PERCEPTION ACTIVE ET MANIPULATION D'OBJETS

Les travaux ont porté sur la perception des caractéristiques géométriques et dynamiques des objets, notamment dans le contexte de la perception active c'est-à-dire lorsque le sujet est engagé dans une tâche motrice impliquant une interaction forte entre le traitement des informations sensorielles et l'exécution d'une action. Les recherches s'articulent autour de trois principales méthodologies : la psychophysique et la psychologie expérimentale, l'imagerie fonctionnelle et la modélisation.

6.1. PERCEPTION VISUELLE DES OBJETS

J. DROULEZ, M. WEXLER, C. MORVAN, M. VALLET

L'un des thèmes majeurs est l'étude des indices visuels de la forme tridimensionnelle des objets. Cette étude se fonde essentiellement sur des méthodes psychophysiques quantitatives. Dans un premier temps, nous avons caractérisé la capacité à percevoir une courbure 3D à partir du mouvement dans différentes conditions de stimulation visuelle : taille du champ visuel, durée de présentation, orientation relative du mouvement et des courbures principales. Nous avons ensuite étudié le rôle des indices statiques, notamment la perspective linéaire, le gradient de densité de points et la texture produite par les conditions d'éclairage (« bump-mapping ») en présentant aux sujets des stimuli conflictuels dans lesquels deux indices conduisent à des interprétations tridimensionnelles différentes. Nous avons également cherché à caractériser la capacité perceptive humaine à estimer l'orientation d'un plan en mouvement, en fonction de la taille du stimulus visuel, de l'orientation relative et de l'amplitude du mouvement et de la durée de l'exposition. Ces résultats ont des conséquences fondamentales au niveau théorique car ils permettent d'invalider un certain nombre d'hypothèses communément admises concernant le traitement du flux optique en vision 3D.

6.2. CONTRIBUTION DES INFORMATIONS EXTRA-VISUELLES ET PERCEPTION ACTIVE

M. WEXLER, C. MORVAN, J. DROULEZ

Dans une situation de perception active, lorsque le sujet est lui-même en mouvement, il dispose, en plus du flux visuel, de nombreuses informations sur son propre mouvement. Les informations de mouvement propre sont d'origines diverses (vestibulaires, proprioceptives, copies efférentes des commandes motrices) et peuvent contribuer à différents niveaux au traitement 3D des informations visuelles. Nous avons démontré et analysé quantitativement cette contribution dans la perception des distances absolues, de l'orientation des surfaces planes et du signe de la courbure 3D des objets. Nous avons en particulier montré que cette contribution n'est pas un simple indice additionnel (la parallaxe de mouvement) mais repose sur une contrainte interne conduisant l'observateur à préférer les interprétations tridimensionnelles stationnaires par rapport à un référentiel

allocentrique. Dans certaines conditions, cette contrainte de stationnarité peut même l'emporter sur les contraintes de rigidité de l'objet et de régularité des textures.

6.3. CARACTÉRISATION DES INFORMATIONS HAPTQUES

J. DROULEZ (LPPA), D. TOFFIN (CTS Renault) ; en collaboration avec
J. McINTYRE (LPPA)

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.

6.4. PERCEPTION ET ATTRIBUTION DE PROPRIÉTÉS AUX OBJETS

J. DROULEZ (LPPA), N. BULLOT (CTS Renault)

L'extraction des propriétés d'objets par les différents canaux sensoriels n'est pas toujours suffisante ni nécessaire pour définir l'identité d'un objet. Par exemple dans une opération de comptage d'éléments semblables, ou dans le suivi attentionnel simultané de plusieurs objets en mouvement, les sujets sont capables de distinguer et de maintenir l'assignation d'attributs aux entités distinctes. Dans une première étude expérimentale inspirée du problème du voyageur de commerce, nous avons montré que l'attribution de propriétés logiques (prédicats) liée à la planification de l'action n'utilise pas nécessairement une référence spatiale commune partagée avec les mécanismes sensori-moteurs. Cette attribution pourrait résulter de l'établissement de liens déictiques fondés sur une référence par pointeurs.

6.5. MODÉLISATION BAYÉSIENNE DES COMPORTEMENTS SENSORI-MOTEURS

J. LAURENS, S. CAPERN, J. DROULEZ

Nous sommes 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. Ce projet est décrit plus en détails dans la section des projets multi-équipes. Dans le cadre de ce programme de recherche, 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. Le premier travail a consisté à établir un état de l'art et a réalisé les premiers essais de validation dans les quatre domaines suivants : Nous avons reproduit et comparé les performances de plusieurs algorithmes d'estimation de flux optique dense à partir de séquences d'images. Nous avons confirmé la validité de l'approche probabiliste proposée par Simoncelli (2001) et nous avons adapté cet algorithme aux caractéristiques du robot développé dans le cadre du projet BIBA. Nous avons également développé un modèle bayésien dynamique de la perception du mouvement propre à partir des informations vestibulaires. Dans ce modèle, les caractéristiques dynamiques de la perception du mouvement et les ambiguïtés qui résultent de l'équivalence gravité-inertie sont expliquées par les connaissances *a priori* quantifiées de façon probabiliste. Enfin, nous avons montré comment les informations extéroceptives, fournies par un proximateur laser à balayage, et les informations proprioceptives, fournies par les capteurs de déplacement d'un robot, peuvent être fusionnées de manière optimale en tenant compte de l'incertitude des signaux fournis par chacun des capteurs. Cette fusion permet d'une part d'améliorer l'estimation du déplacement du robot (localisation), et d'autre part de construire un modèle fiable de son environnement.

6.6. BASES NEURALES DE LA CONSTRUCTION D'OBJETS À PARTIR DU MOUVEMENT

VISUEL : ÉTUDES EN NEUROIMAGERIE

A.-L. PARADIS

À partir du flux optique rétinien en changement perpétuel, le cerveau parvient à construire une perception cohérente, segmentée en objets, de l'environnement visuel. Nous nous intéressons aux processus cérébraux qui permettent de construire ces objets visuels et leurs propriétés.

Nous avons réalisé une expérience en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) et en Magnéto- et Électro-EncéphaloGraphie (MEG et EEG) chez une douzaine de sujets. Dans ce protocole, nous comparons les activités liées à l'apparition d'un mouvement aléatoire, à la mise en mouvement d'une surface 3D ou à la transition entre un mouvement aléatoire et une surface 3D. Il s'agit ainsi de déterminer la localisation et les latences de différentes étapes d'analyse du mouvement visuel pour la construction d'un percept 3D.

Nous avons également débuté un projet en collaboration avec J. Lorenceau (LENA, UPR640) et J.-B. Poline (SHFJ, CEA) en IRMf. Le stimulus est formé de quatre segments en mouvement. Ceux-ci peuvent sembler bouger indépendamment ou au contraire former les quatre côtés d'une figure en translation circulaire. La perception peut alterner spontanément entre les deux interprétations ou être influencée par la modulation de certains paramètres visuels (contraste, forme de la figure, bruit sur le mouvement local). Parallèlement, nous réalisons des expériences de repérage afin de mettre en évidence, chez chaque sujet, les aires visuelles rétiniotopiques, ainsi que celles impliquées dans la perception du mouve-

ment visuel. Nous étudierons ainsi le comportement des ces aires visuelles en fonction des modulations physiques du stimulus et/ou de la perception rapportée par les sujets, afin de déterminer leur rôle dans la construction perceptive.

7. IMMERSION ET COUPLAGE PERCEPTION-ACTION EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

A. KEMENY, D. TOFFIN, M. VALLET, F. PANERAI, D. PAILLE (CTS) ; en collaboration avec Renault (Centre Technique de Simulation et LPPA)

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 *l'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 SENSORI-MOTRICE DANS UN SIMULATEUR DE CONDUITE : CONTRIBUTION DE LA RESTITUTION DU MOUVEMENT À LA RÉALISATION DES TÂCHES ÉLÉMENTAIRES DE CONDUITE

F. PANERAI, A. KEMENY, G. REYMOND (CTS Renault), A. BERTHOZ, J. DROULEZ (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 DISTANCE ET DE VITESSE

F. PANERAI, A. KEMENY (CTS Renault), A. BERTHOZ, 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 simulé (Kemeny *et al.*, 2002).

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

D. TOFFIN, A. KEMENY (CTS Renault), 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 expéri-

mentation, 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 VISUO-VESTIBULAIRES LORS DE LA PERCEPTION DES DISTANCES EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

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

Les technologies de réalité virtuelle permettent une visualisation interactive et immersive 3D en temps réel. L'expérience montre que la perception des distances est perturbée lors de l'observation d'une scène virtuelle par un observateur statique ou dynamique. 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, oclusions, hauteur dans le champ visuel, gradient de texture ou encore champ de vision. Afin de mieux comprendre ces « illusions perceptives », les interactions entre la convergence, la parallaxe et la taille du champ de vision sont à l'étude. Des expérimentations en environnement réel ont montré que la réduction de la taille du champ de vision entraîne une compression de la distance perçue. Dans ce cadre, nous avons, effectué une première expérimentation visant à tester l'influence de la taille du champ de vision sur la perception des distances aux objets proches en environnement virtuel. Après avoir observé, sans restriction de temps et de champ de vision, un environnement réel connu, les sujets devaient observer la réplique virtuelle de l'environnement réel et comparer la distance égocentrique à un objet proche dans deux conditions de champ de vision (un champ réduit à 60° et un champ large de 120°). Nous avons observé une sous estimation de la perception des distances aux objets proches dans le cas d'un champ de vision réduit. Nos résultats montrent également que la perception est plus réaliste avec un grand champ de vision qu'avec un petit champ de vision.

Dans une seconde expérimentation, dont le protocole était similaire, nous avons pu déterminer que l'indice important, en terme de perception des distances égocentriques en environnement virtuel, était le rapport entre la taille angulaire de l'objet et la taille angulaire du champ de vision. Plus la taille angulaire de l'objet est grande dans l'image plus il est difficile d'effectuer un jugement de distance.

Nos résultats montrent l'importance de l'information rétinienne par rapports aux informations kinesthésiques pour ce genre de tâche dans un environnement à indices multiples. Notre étude montre également que le cerveau humain intègre dans le temps les mouvements de tête de l'observateur pour élargir son champ de vision statique à un champ de vision dynamique dont il se sert de référence pour la tâche d'estimation de distance.

Afin de mieux comprendre ces phénomènes, les interactions entre les différents indices visuels de perception des distances seront étudiés 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 Renault), 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 fournissent 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. 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. 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. RÔLE DU SYSTÈME VESTIBULAIRE ET SÉLECTION DES ENTRÉES SENSORIELLES DANS LA NAVIGATION ET LE CONTRÔLE DU MOUVEMENT : RECHERCHE SUR LE RAT

8.1. ÉTUDES NEUROCOMPUTATIONELLES

A. ARLEO, T. DEGRIS, C. BOUCHENY, N. BRUNEL (Lab. de Neurophysique et Physiologie du Système Moteur, Université Paris 5), S. WIENER

Nous avons élaboré un modèle des plusieurs structures anatomiques impliquées dans la genèse et la mise à jour du signal de cellules de direction de la tête (DT). Le paradigme des neurones formels impulsionnels de type « Leaky Integrate and Fire » a été utilisé. Un deuxième outil théorique utilisé a été le paradigme des réseaux attracteurs continus qui nous a permis de reproduire des propriétés des cellules DT telles que la persistance du signal de direction en l'absence d'entrées externes ainsi que la stabilité de la représentation DT au fil du temps. Enfin, le paradigme de l'apprentissage Hebbien a été utilisé afin de permettre au système d'incorporer les informations sensorielles multi-modales de façon adaptative. Le modèle théorique nous a permis, à l'aide de simulations numériques, de reproduire les résultats expérimentaux concernant le temps de mise à jour du signal DT lors d'une rotation des repères visuels, ainsi que le rôle des informations visuelles dynamique (par exemple, le flux optique) dans la discrimination de la part du système DT entre repères au premier plan et repères à l'arrière plan. Le modèle neuromimétique des cellules DT a donné lieu à une implémentation robotique, ce qui a permis à la fois de valider le système dans des conditions réelles et à la fois d'équiper un robot mobile d'un système directionnel biologiquement inspiré.

8.2. ÉTUDES DE NEUROPHYSIOLOGIE DE LA COGNITION SPATIALE

A. MULDER, E. TABUCHI, S. WIENER, A. ARLEO, M. ZUGARO, E. BURGUIÈRE, C. DÉJEAN

L'idée de l'hippocampe comme carte cognitive de l'espace a toujours posé le problème que l'hippocampe code seulement le placement actuel de l'animal, et non sa destination. Plusieurs théoriciens ont essayé de résoudre ce problème en postulant la présence des *cellules de but* — cellules qui s'activent dès l'instant qu'on décide d'aller vers un endroit précis jusqu'à son arrivée là-bas. Dans cette étude nous avons trouvé ces cellules au niveau du noyau accumbens et le noyau caudé (qui reçoivent des projections de l'hippocampe et du cortex entorhinal).

Des rats adultes assoiffés sont entraînés dans un labyrinthe en forme de croix. Nous avons enregistré plus de 200 neurones dans l'Acb et le noyau caudé. Grâce

à une nouvelle analyse, nous avons pu découvrir un nouveau type de réponse qui survient entre l'instant où les lumières (qui servent de balises) sont allumées, et l'instant où l'animal arrive au réservoir d'eau. Ceci correspond à la réponse prévue pour les cellules de but. Différentes cellules codent différent parcours, et l'enchaînement d'activation de plusieurs neurones de ce type peut bien coder des trajectoires longs et complexes. Nous avons effectué également des manipulations expérimentales pour comprendre quelles sont les caractéristiques des stimuli qui sont utilisées par le système directionnel pour déterminer la distance relative, en regardant tout particulièrement la parallaxe de mouvement. Nous avons montré qu'une lampe stroboscopique bloque les effets de parallaxe parce qu'elle perturbe la comparaison des vues successives prises dans les différentes positions de la tête et la comparaison des vitesses apparentes des repères plus ou moins distants.

8.3. CONSÉQUENCES D'UNE INACTIVATION GÉNÉTIQUE SUR LES PROCESSUS NEURONAUX 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), L. MARIANI (Université Paris VI), C. 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 corrélé 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 du 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. 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 entraînent 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.

8.4. APPRENTISSAGES DIFFÉRENTIÉS POUR LA SÉLECTION DE L'ACTION DANS LES GANGLIONS DE LA BASE CHEZ LE RAT. ENREGISTREMENTS ÉLECTROPHYSIOLOGIQUES, MODÈLES COMPUTATIONNELS ET IMPLÉMENTATION ROBOTIQUE
M. KHAMASSI, S. WIENER, A. BERTHOZ, F. BATTAGLIA (LPPA), A. GUILLOT, J. ARCADY MEYER, L. LACHEZE, B. GIRARD (LIP6-CNRS)

Le travail de thèse présenté ici s'inscrit dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire entre la neurophysiologie et la modélisation computationnelle, qui présente deux objectifs principaux : d'une part, comprendre la nature des traitements cognitifs impliqués dans les processus de décision pour l'action chez le rat, et les mécanismes neuraux qui sous-tendent ces processus. La modélisation robotique peut aider à cette compréhension puisqu'elle permet d'observer les propriétés dynamiques de structures nerveuses dans leur ensemble alors que l'électrophysiologie ne permet à ce jour d'enregistrer qu'une centaine de neurones simultanément. D'autre part, concevoir des robots « animats », c'est-à-dire inspirés des animaux, faisant preuve d'autonomie et d'adaptation face à des environnements changeants, mais pouvant également servir de modèles du comportement animal (Webb, 2001 ; Guillot et Meyer, 2003). Alors que la robotique classique ne parvient généralement à implémenter que des robots monotâches, l'approche biomimétique pourrait, en s'inspirant des interactions entre les aires cérébrales

et de leurs architectures, parvenir à concevoir des robots combinant plusieurs fonctions réflexes et/ou cognitives. L'objectif de cette thèse est de proposer un modèle computationnel et une implémentation robotique des mécanismes d'apprentissage de l'attribution de récompense dans les ganglions de la base chez le rat. Un tel modèle vise à mieux comprendre comment une telle structure nerveuse implémente — dans plusieurs boucles cortex-ganglions de la base-thalamus-cortex — des contrôles parallèles de comportements moteurs, à des échelles de temps différentes (Alexander *et al.*, 1990) afin de sélectionner les actions ou plans d'actions qui mènent à des récompenses et d'éviter celles qui conduisent à des punitions. Une hypothèse a été récemment formulée selon laquelle différentes parties des ganglions de la base implémenteraient des processus d'apprentissage différents mais complémentaires (Pennartz *et al.*, 1994 ; Graybiel, 1995, 1998 ; Ikemoto et Panksepp, 1999 ; Cardinal *et al.*, 2002 ; Everitt et Wolf, 2002) : d'une part, la partie reliée au striatum dorsal constituerait un système de contrôle des habitudes ou comportements procéduraux, en procédant à l'apprentissage et la sélection des associations stimulus-réponse. D'autre part, la partie reliée au striatum ventral et plus particulièrement au noyau accumbens, formerait un système plus flexible impliqué dans l'apprentissage et le contrôle des comportements orientés vers un but, tenant compte du contexte sensorimoteur, spatial et motivationnel de l'animal pour ce contrôle.

9. MÉMOIRE SPATIALE ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT

9.1. GÉOMÉTRIE DU TRAJET ET PATTERN LOCOMOTEUR

H. HICHEUR, A. BERTHOZ ; en collaboration avec l'INSEP et la Société ATOPOS

Nos travaux portent sur l'influence des propriétés géométriques du trajet sur le pattern locomoteur lors de la génération de trajectoires locomotrices chez l'Homme. Le pattern locomoteur est analysé au niveau de la cinématique globale du corps mais également à travers la coordination inter-segmentaire. Nous avons pu montrer que la géométrie du trajet contraint de manière très forte la vitesse de marche. En outre les variations géométriques dans le trajet influencent également le comportement de stabilisation et d'anticipation de la tête, révélant une interaction entre la nécessité de maintenir une stabilité dynamique de l'appareil locomoteur et une simulation mentale du trajet à venir permettant l'ancrage de la tête en des points particuliers de l'environnement. Ces travaux reposent sur l'analyse cinématique de la marche dans des différentes conditions (plusieurs vitesses de marche et plusieurs types de trajets) et sont maintenant enrichis par l'analyse simultanée du déplacement des yeux.

9.2. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES INTERACTIONS ENTRE DEUX PERSONNES AU COURS D'UNE TÂCHE LOCOMOTRICE DE MAINTIEN DE DISTANCE

M. FRESLIER, A. BERTHOZ (LPPA) ; en collaboration avec T. DUCOURANT (INSEP), J.-J. SLOTINE (MIT Cambridge), T. FLASH (Weizmann Institute Rehovot, Israël)

La coordination du mouvement de deux individus lors de la locomotion n'a pas été étudiée. En revanche, la coordination de divers types de mouvements intersegmentaires a largement été décrite au cours des 20 dernières années *via* une approche dynamique dans le cadre du contrôle moteur (Kelso *et al.*, 1981, 1984, 1985 ; Schmidt, 1990). Dans la présente étude, nous nous intéressons à la coordination du mouvement de deux partenaires dans une tâche de locomotion. Les deux sujets se déplacent face à face à l'intérieur d'un couloir (8 m \times 2 m) avec pour consigne de maintenir une distance constante entre eux. Un des deux sujets a le rôle de meneur. Nous proposons un modèle pour décrire les déplacements des sujets basés sur deux oscillateurs de Van der Pol couplés en vitesse. Sous certaines conditions, nous avons pu reproduire les profils de déplacements observés. Cependant des améliorations sont à apporter afin de représenter la grande variété de ces déplacements et les caractéristiques liées à la marche humaine.

9.3. INTÉGRATION MULTISENSORIELLE PENDANT LA NAVIGATION

P. PANAGIOTAKI, S. LAMBREY, A. BERTHOZ

L'information multisensorielle est nécessaire pour l'encodage spatial des trajectoires naviguées. Nous soutenons l'idée théorique que ce processus multisensoriel est issu non seulement des mécanismes cognitifs du type « bottom-up » mais aussi des mécanismes du type « top-down ». À l'étude présente, nous avons investigué la possibilité d'influence d'un conflit multisensoriel à la reproduction des trajets navigués et déjà mémorisés qui ne sont pas associés avec ce conflit-là. L'étude est réalisée en utilisant un environnement virtuel. En plus, nous avons investigué la contribution de la compréhension du conflit à la mémorisation du trajet. L'expérience est composée de trois tâches dans des couloirs virtuels ; à la première tâche, les sujets naviguaient dans des couloirs virtuels réalisant des translations passives et des rotations du corps entier passives et ils mémorisaient leur trajet (Tâche 1). Deux conflits sensoriels différents entre l'information visuelle et non-visuelle sont introduits en façon randomisée pendant cette navigation. Ensuite, les sujets naviguaient dans un couloir intermédiaire sans le mémoriser, où des conflits sensoriels identiques ou différents du couloir expérimental étaient introduits (Tâche 2). Après l'intermédiaire navigation, les sujets reproduisaient le trajet mémorisé (de la première navigation) avec des translations passives et des rotations actives dans un environnement complètement sombre (Tâche 3). Les données recueillies sont issues : a) des amplitudes angulaires des rotations actives des sujets pendant la reproduction du couloir mémorisé ; et b) des réponses des sujets issues d'un questionnaire semi-structuré. Selon ces

réponses les sujets sont regroupés dans trois groupes de compréhension du conflit : (0) « Aucune compréhension du conflit » ; (1) « Compréhension complète du conflit » ; et (2) « Quelque chose de Bizarre » groupe. Les deux types de données sont analysés et corrélés. En accord avec nos études précédentes, les résultats indiquent que la mémorisation des trajets se réalise en corrélation avec le conflit associé. En plus, les résultats indiquent que la reproduction des trajectoires ne pouvait pas être influencée par un conflit non-associé avec sa navigation et encodage. De surcroît, les résultats présentent un effet significatif de la compréhension du conflit à la mémorisation du trajet. Ces deux résultats présentent des évidences de la contribution des mécanismes « top-down » au processus de l'intégration multisensorielle pendant l'encodage des trajets navigués.

9.4. MÉCANISMES HIÉRARCHIQUES COGNITIFS D'ENCODAGE PENDANT LA NAVIGATION SPATIALE SUR LES HUMAINS : ÉTUDES PSYCHOPHYSIQUES EN RÉALITÉ VIRTUELLE

P. PANAGIOTAKI, J. DIARD, A. LEHMANN, A. BERTHOZ ; en collaboration avec le laboratoire GARGIR INRIA (Grenoble)

Des études éthologiques et psychologiques-expérimentales présentent des indices de deux stratégies principales d'encodage de l'information spatiale pendant la navigation en de nouveaux environnements chez les insectes et les rongeurs : a) l'encodage des amers visuels et b) l'encodage de l'intégration de trajet. Ces études suggèrent que la première stratégie soit hiérarchiquement à un plus haut niveau cognitif que la stratégie de l'intégration de trajet. Pourtant, c'est démontré qu'un encodage de l'intégration de trajet du type « sauvegarde » a lieu et peut s'utiliser au cas de disparition soudaine des amers visuels de l'environnement mémorisé. Chez les humains il y a encore peu de recherches étudiant la présence et le rôle de ces stratégies cognitives élémentaires de l'encodage spatial. Des sujets volontaires ont navigué passivement et ont mémorisé des trajectoires différentes dans une ville virtuelle (COSMOPOLIS) et puis ils ont reproduit chaque trajet en façon semi-active. L'orientation de la tête à l'axe horizontal était enregistrée par un système magnétique avec un rapport de fréquence de 50Hz. Ce système permettait aussi la rotation active du sujet dans l'environnement virtuel. Pour la translation active les sujets ont utilisé une manette. Ce travail est fait dans le cadre du projet européen BIBA. Deux versions principales de la ville virtuelle ont permis l'investigation des stratégies cognitives pour la mémorisation des trajets navigués en des espaces urbains : i) la version des amers visuels et ii) la version de la configuration géométrique (à l'absence totale des amers visuels dans la ville). La performance des sujets était enregistrée pendant chaque navigation semi-active (par un tracker de mouvement placé sur la tête et les coordonnées de position et d'orientation de la manette). Ces données sont analysées en corrélation avec les réponses que les sujets donnaient à un questionnaire où ils répondaient après la fin de chaque navigation ainsi qu'à la fin de toute l'expérience. Ce questionnaire demandait la description verbale des « façons » utilisées par les sujets pour la mémorisation de chaque trajet. L'analyse statistique

de nos résultats préliminaires indique que : a) il y a une préférence hiérarchique de l'encodage selon les amers visuels versus l'encodage géométrique ; b) malgré cette « préférence », l'existence d'une sauvegarde du type « encodage géométrique » a lieu à l'absence des amers visuels afin de reproduire un trajet navigué et mémorisé. Les indices de la hiérarchisation de ces deux mécanismes cognitive de la mémorisation spatiale introduisent une nouvelle approche théorique en ce qui concerne la performance de l'encodage des navigations spatiales dans des espaces urbains chez les humains.

9.5. IMPLICATION DES STRUCTURES MÉDIANES DU LOBE TEMPORAL DANS LA MÉMOIRE SPATIALE DES ENVIRONNEMENTS À GRANDE ÉCHELLE : DE LA ROUTE AU CHANGEMENT DE POINT DE VUE

S. LAMBREY, M.-A. AMORIM, A. BERTHOZ ; en collaboration avec le Service de Neurologie de l'Hôpital de la Salpêtrière, S. SAMSON, M. NOUHLIANE, C. LANCELOT, S. DUPONT, M. BAULAC

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...) (1). Dans une autre étude, nous avons testé des patients présentant les mêmes caractéristiques que ci-dessus sur leur capacité à gérer des changements de point de vue dans un environnement virtuel et à détecter des modifications au sein de cet environnement (par exemple, le déplacement d'une lampe) après un changement de point de vue (2). Les résultats ont montré que les patients lésés à gauche étaient significativement moins précis que les contrôles lorsqu'une stratégie verbale était la plus adéquate pour effectuer la tâche. En revanche, ce déficit disparaissait lorsque la tâche devenait plus complexe et

qu'une stratégie verbale ne présentait plus d'avantages. Les patients lésés à droite, quant à eux, étaient moins précis que les contrôles dans le deuxième cas de figure, c'est-à-dire lorsqu'ils ne pouvaient plus compenser leur déficit visuo-spatial par une stratégie verbale. Ainsi, ces résultats suggéraient un autre type de latéralisation fonctionnelle des structures médianes du lobe temporal. Mais de manière intéressante, il est possible de rapprocher les stratégies verbales de mémorisation de la mémoire séquentielle dont il est question dans l'expérience précédente. De même, nous pouvons faire le rapprochement entre stratégie visuo-spatiale et mémoire inférentielle. Ces notions feront l'objet de nos prochaines études.

9.6. ÉTUDE CONTRÔLÉE MULTICENTRIQUE DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET DE LA THÉRAPIE COGNITIVO-COMPORTEMENTALE DANS LE TROUBLE PANIQUE AVEC L'AGORAPHOBIE

A. BERTHOZ, P. PANAGIOTAKI (LPPA) ; en coopération avec J. COTTAUX (Hospices Civile de Lyon), R. JOUVENT (Hôpital de la Salpêtrière), P. PULL (Luxembourg)

L'étude en cours vise à comparer deux techniques de traitement de l'agoraphobie : traitement de la réalité virtuelle (TRV) et traitement cognitif comportemental (TTC). Dans le cadre de notre collaboration avec les Hospices Civils de Lyon, nous avons élaboré un dispositif composé d'environnements virtuels représentant douze situations phobiques (grand espace, supermarché, cinéma, tunnel, conduite de voiture, bus, métro, etc.). Ce dispositif permet la cognition spatiale des agoraphobes dans les deux modalités de traitement. On peut émettre l'hypothèse que certains types d'attaque de panique phobique sont dus aux difficultés à établir une cohérence entre les différentes entrées sensorielles d'une part et à résoudre, d'autre part, les conflits entre la représentation du corps propre et la perception des relations du corps et de l'espace. Trois postes sont actuellement installés dans les centres hospitaliers du Luxembourg, de la Salpêtrière et à l'Institut de l'Anxiété à Lyon. Ce travail est soutenu par un PHRC de l'Assistance Publique.

SÉMINAIRES

Séminaires organisés par le laboratoire

2003

— 2 décembre : Pr P.W. BURGESS (Institute of Cognitive Neuroscience, University College London), « The fonctions of the human rostral prefrontal cortex ».

— 15 décembre : Dr V. CORNILLEAU-PERES (Lab. de Neurosciences Fonctionnelles et Pathologies, CNRS, Lille), « Deux rôles fonctionnels du flux optique : Perception 3D et stabilisation posturale ».

— 16 décembre : Dr M. HALLETT (National Institute of Health/Minos), « Human motor learning ».

2004

— 22 mars : Dr S. DENEVE (University College London, Royaume Uni), « Optimal integration of noisy sensory signals by recurrent cortical networks : a Bayesian approach ».

— 3 mai : Pr R. KLATZKY (Carnegie-Mellon, University USA), « Encoding Spatial Representations from Vision, 3D sound, and Language : Are the representations functionally equivalent ? ».

— 24 juin : Pr S. LISBERGER (Dept. Physiology, University of California, San Francisco, USA), « From vision to action ».

PUBLICATIONS

Reuves à comité de lecture

ALBERTIN, S., MULDER, A. & WIENER, S. (2003) : The advantages of electrophysiological control for the localization and selective lesioning of the nucleus accumbens in rats, *Neurosci. Behav. Physiol.*, 33 (8) : 805-809.

BERTIN, R. & BERTHOZ, A. (2004) : Visuo-vestibular interaction in the reconstruction of travelled trajectories, *Exp. Brain Res.*, 154 (1) : 11-21.

BERTHOZ, A. & CHAPOUTIER, G. (2003) : Posture and balance responses to a sensory challenge are related to anxiety in mice, *Psychiatry Research*, 118 : 273-284.

BREMMER, F., SCHLACK, A., GRAF, W. & DUHAMEL, J.R. (2004) : Multisensory self-motion encoding in parietal cortex, *Visual Cognition*, 11 : 161-172.

BUCCI, M.P., KAPOULA, Z., YANG, Q., WIENER-VACHER, S. & BREMOND-GIGNAC, D. (2003) : Eye movements in 3D in a young subject with Congenital Central Hypoventilation Syndrome (CCHS), *Strabismus*, 11 (2) : 95-107.

BUCCI, M.P., KAPOULA, Z., YANG, Q., WIENER-VACHER S. & BREMOND-GIGNAC, D. (2004) : Abnormalities of vergence in children with vertigo, *Journal of Neurology*, 251 (2) : 204-213.

BULLOT, N., DROULEZ, J. & PYLYSHYN, Z.W. (2003) : Keeping track of objects while exploring an informationally impoverished environment : Local deictic versus global spatial strategies, *Journal of Vision*, 3 (9) : 323a.

COUBARD, O., DAUNYS, G. & KAPOULA, Z. (2004) : Gap effects on saccade and vergence latency, *Exp. Brain Res.*, 154 (3) : 368-381.

DEGRIS, T., SIGAUD, O., WIENER, S. & ARLEO A. (2004) : Rapid response of head direction cells to reorienting visual cues : A computational model., *Neurocomputing*, 58-60C : 675-682.

GIRARD, B., CUZIN, V., GUILLOT, A., GURNEY, K.N. & PRESCOTT, T.J. (2003) : A Basal ganglia inspired model of action selection evaluated in a robotic survival task, *Journal of Integrative Neuroscience*, 2 (2) : 179-200.

GRAF, W. (2003) : The spa at Kreuth, or Why did the Russian czars visit there ?, *Ann. NY Acad. Sci.*, 1004 : 15-17.

GRANTYN, A., MOSCHOVAKIS, A. & KITAMA, T. (2004) : Control of orienting movements : role of multiple tectal projections to the lower brainstem., *Prog. Brain Res.*, 143 : 423-438.

GREZES, J., ARMONY, J., ROWES, J. & PASSINGHAM, R. (2003) : Activations related to « Mirror and “Canonical” neurones in the human brain : a fMRI study », *NeuroImage*, 18 : 928-937.

GROSBRAS, M., LOBEL, E. & BERTHOZ, A. (2004) : The control of gaze (2) : cortical control of ocular saccades : functional brain imaging data, *Med. Sci. Paris*, 20 (2) : 225-230.

ISOTALO, E., KAPOULA, Z., FERET, P.H., GAUCHON, K., ZAMFIRESCU, F. & GAGEY, P.M. (2004) : Role of binocular vision on postural control., *Auris Nasus Larynx*, 31 (1) : 11-17.

KAPOULA, Z., YANG, Q., COUBARD, O., DAUNYS, C. & ORSSAUD, C. (2004) : Effects of transcranial magnetic stimulation of the posterior cortex on isolated and combined saccade-vergence movements, *Neurosci. Letters*, 360 : 95-99.

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

KLAM, F. & GRAF, W. (2003) : Vestibular response kinematics in posterior parietal cortex neurons of macaque monkeys, *Eur. J. Neurosci.*, 18 : 995-1010.

KLAM, F. & GRAF, W. (2003) : Vestibular signals of posterior parietal cortex neurons during active and passive head movements in macaque monkeys, *Ann. NY. Acad. Sci.*, 1004 : 271-282.

LAMBREY, S. & BERTHOZ, A. (2003) : Combination of conflicting visual and non-visual information for estimating actively performed body turns in virtual reality, *International Journal of Psychophysiology*, 50 (1-2) : 101-115.

MOURAS, H., STOLERU, S., BITTOUN, J., GLUTRON, D., PELEGRINI-ISSAC, M., PARADIS, A. & BURNOD, Y. (2003) : Brain processing of visual sexual stimuli in healthy men : a functional magnetic resonance imaging study, *NeuroImage*, 20 (2) : 855-869.

MULDER, A., TABUCHI, E. & WIENER, S.I. (2004) : Neurons in hippocampal afferent zones of rat striatum parse routes into multi-pace segments during maze navigation, *Eur. J. Neurosci.*, 19 : 1923-1932.

PETIT, J.-L. (2003) : On the relation between recent neurobiological data on perception (and action) and the husserlian theory of constitution, *Phenomenology and the cognitive sciences*, 2 (4) : 281-298.

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 (1) : 219-237.

TABUCHI, E., MULDER, A. & WIENER, S.I. (2003) : Reward value invariant place responses and reward site associated activity in hippocampal neurons of behaving rats, *Hippocampus*, 13 : 117-132.

TZELEPI, A., LUTZ, A. & KAPOULA, Z. (2004) : EEG activity related to preparation and suppression of eye movements in 3D space, *Exp. Brain Res.*, 155 (4) : 439-449.

TOFFIN, D., MCINTYRE, J., DROULEZ, J. & KEMENY, A. (2003) : Perception and Reproduction of Force Direction in the Horizontal Plane, *Journal of Neurophysiology*, 90 (5) : 3040-3053.

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

VIDAL, M., AMORIM, M.A. & BERTHOZ, A. (2004) : Navigating in a virtual three-dimensional maze : How do egocentric and allocentric reference frames interact ?, *Cognitive Brain Res.*, 19 (3) : 244-258.

VIDAL, M., LIPSHITS, M., MCINTYRE, J. & BERTHOZ, A. (2003) : Gravity and Spatial Orientation in Virtual 3D-Mazes, *Journal of Vestibular Res.*, 13 (4-6) : 273-286.

VIDAL, P.P. & DROULEZ, J. (2003) : Postures et chimères ou la philosophie dans la salle de bain, *Intellectica*, 36-37 : 161-180.

VITU, F., KAPOULA, Z., LANCELIN, D. & LAVIGNE, F. (2004) : Eye movements in reading : evidence for strong biases towards the center of the screen, *Vision Res.*, 44 (3) : 321-338.

WIENER, S.I. & ARLEO, A. (2003) : Persistent activity in limbic system neurons : Neurophysiological and modeling perspectives, *Journal of Physiology*, 97 : 547-555.

YANG, Q. & KAPOULA, Z. (2003) : Binocular coordination of saccades at far and at near in children and in adults, *Journal of Vision*, 3 : 554-561.

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

ZUGARO, M.B., ARLEO, A., DÉJEAN C., BURGUIÈRE, E., KHAMASSI, M. & WIENER, S.I. (2004) : Rat anterodorsal thalamic head direction neurons depend upon dynamic visual signals to select anchoring landmark cues, *European Journal of Neuroscience*, 20 : 530-536.

Ouvrages. Diffusion Grand Public

KAPOULA, K. (2004) : Participation à une œuvre et exposition artistique : M. Paysant, Inventarium 03, 8/11-21/02, avec la collaboration de l'Agence urbanisme Dunkerque.

MCINTYRE, J. & AMORIM, A.M. (2003) : Le cerveau anticipateur, *Cerveau & Psycho*, N° 3.

WIENER, S. (2003) : Consultant sur l'exposition « le cerveau intime », 22/10/2002-30/09/2003 « Le jeu du labyrinthe », Cité des Sciences et de l'Industrie.

Chapitres d'ouvrages collectifs

BERTHOZ, A. (2003) : « Stratégies cognitives et Mémoire spatiale ». In : *Philosophies de la perception, Phénoménologie, grammaire et sciences cognitives*. Eds : J. Bouveresse et J.-J. Rosat. Collège de France, Paris, Odile Jacob, pp. 101-109.

BERTHOZ, A. (2003) : « Reference frames and cognitive strategies during navigation : is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory ? ». In : Ono *et al.*, (eds), *Cognition and Emotion in the Brain*, Elsevier, N.Y., pp. 261-274.

GRAF, W. (2003) : Der Gleichgewichtssinn. 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. Scharfl and K. Unsicker). Deutscher Ärzte-Verlag : Köln, pp. 207-222.

GRANTYN, A., MOSCHOVAKIS, A.K. & KITAMA, T. (2004) : « Control of orienting movements : Role of multiple tectal projections to the lower brain stem ». In : 415-430. In : S. Mori and D.G. Stuart (Eds.), *Brain Mechanisms for the Integration of Posture and Locomotion*, Progress in Brain Research, Elsevier B.V., pp. 415-430.

GRANTYN, A. & MOSCHOVAKIS, A.K. (2004) : « The superior colliculus : Structure-function relationships in the deeper layers ». In : W.C. Hall and A.K. Moschovakis (Eds.), *The Oculomotor System : New Approaches for Studying Sensorimotor Integration*, CRC Press LLC, Boca Raton, pp. 107-145.

PETIT, J.-L. (2003) : « Repenser le corps, l'action et la cognition avec les neurosciences ». In : *Intellectica*, revue de l'association pour la recherche cognitive, n° 36-37, Dossier organisé par J.-L. Petit, avec Exposition thématique, par J.-L. Petit & Nouvelles propositions pour une physiologie de l'action, par A. Berthoz & J.-L. Petit, Actes des Ateliers « Philosophie de l'action et Neurosciences », 2000-2001 au Collège de France, ISSN N° 0769-4113, 457 p.

PETIT, J.-L. (2003) : « Repousser les limites du corps ». In : in Actes du Colloque Espace du Geste et de la Posture, Caen, avril 2002, Les Cahiers de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines, N° 38, N° spécial publié sous la dir. de F. Lestienne & F. Thullier, MRSR, Caen/CNRS, pp. 9-29.

WIENER, S.I., SHIBATA, R., TABUCHI, E., TRULLIER, O., ALBERTIN, S.V. & MULDER, A.B. (2003) : Spatial and behavioral correlates in nucleus accumbens neurons in zones receiving hippocampal or prefrontal cortical inputs. In : T. Ono *et al.* (eds), *Cognition and Emotion in the Brain*, Elsevier N.Y., pp. 275-292.

Conférences sur invitations

2003

ARLEO, A. :

— Journée Maths et Cerveau, « Les bases neuronales de l'orientation spatiale chez le rat : Électrophysiologie, modélisation computationnelle et robotique », Institut Fédératif de Math-Info de Chevaleret, Paris, 27 novembre.

BERTHOZ, A. :

— Symposium de la Chaire de Neuropharmacologie, J. Glowinski, « Dopamine, Ganglions de la base, Cortex préfrontal : Rétrospectives et Perspectives », Chairman, Collège de France, Paris, 4-5 juin.

— « Bases neurales du regard », Journée en l'honneur de Pierre Buser et Arlette Rougeul-Buser : « De la sensori-motricité à la Cognition » Université P. et M. Curie, Paris, 20 juin.

— « Bases neurales du regard », Symposium « Autisme, Cerveau et Développement : de la recherche à la pratique », Collège de France, Paris, 23-24 juin.

— « Cognitive strategies, decision, and changes in point of view in multisensory perception : the example of navigation », 26^e Conférence Européenne sur la Perception Visuelle, Université René Descartes, Paris, 1^{er}-5 septembre.

— « Stratégie cognitive et Mémoire des déplacements », Conférence Fondation IPSEN 1983/2003 : Du Cerveau à la Pensée, Collège de France, Paris, 8 septembre.

— « L'espace selon l'enfant : perçu ou vécu, parcouru ou imaginé, du plaisir ou de l'angoisse », XLV Corso Internazionale di alta cultura Infanzia mito culto consumo, Fondazione Giorgio Cini, Venise, Italie, 20-27 septembre.

— « Espace perçu et espace vécu », Symposium « Les Espaces de l'Homme », Collège de France, Paris, 14 octobre.

— Conférence plénière « The neural bases of human spatial cognition », Swiss-french Meeting on Cognition, Perception and Action : The brain in time and motion : Collegium helveticum, Zurich, Suisse, 16 octobre.

— « Perceptual determinants of normal and abnormal walking », International Workshop : Recent findings on walking disorders in children, Reggio Emilia, Italie, 12 novembre.

— « Principes, lois de simplification et problèmes de référentiels dans la perception et le contrôle du mouvement », Journée Maths et Cerveau, Institut Fédératif de Math-Info de Chevaleret, Paris, 21 novembre.

BULLOT, N.J. :

— « Attention, deictic reference and the MTSP paradigm », Séminaire « Yale Perception & Cognition Laboratory », Yale University, 18 septembre.

— « Attention, référence déictique et perception d'objet », Colloque de la Société de Philosophie Analytique (SOPHA) Langage, Pensée, Action, UQAM et Université de Montréal, Canada, 27 septembre.

GRAF, W. :

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

— « Our (unknown) sense of balance : from reflexes to perception of movement », Howard University College of Medicine, Washington, DC, 1^{er} décembre.

— « Base neurale du mouvement propre : les signaux vestibulaires dans le cortex pariétal chez les singes », INSERM U652 « Neuroimagerie Cognitive », Service Hospitalier Frédéric Joliot, Orsay, 8 décembre.

KAPOULA, K. :

— Séminaires de Mardi : « Contrôle des mouvements des yeux dans l'espace 3D développement et vieillissement chez l'Homme », Service d'ophtalmologie Pr Necker, Hôpital Necker, Paris, 3 juin.

— « Development of saccade and vergence in children/cortical substrat », 25th anniversary of Laboratory of Sensorimotor Research, National Institutes of Health, National Eye Institute, Bethesda USA, 18-20 septembre.

— « Exploration oculomotrice des tableaux de la période cubiste de Fernand Léger », Colloque du RTP Artistique CNRS, 2^e Rencontres Arts-Sciences de la Cognition, Toulouse, 22-23 septembre.

MILEA, D. :

— « Le rôle du lobe frontal dans le contrôle cortical de l'oculomotricité », Programme de la Journée scientifique de l'IFR49, Institut d'Imagerie neuro-fonctionnelle, Domaine de St Paul, St-Remy-lès-Chevreuse, 11 décembre.

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 P. et M. Curie, Paris, 20 juin.

— « New vista about the callosal cortical maps in cat's primary visual cortex », (Invitant : Pr S. Tanaka), Brain Science Institute, Riken Institute, Tokyo, Japon, décembre.

PETIT, J.-L. :

— « Neuroplasticité et codage », Conférence au Centre de Synthèse pour une Épistémologie Formelle, dirigé par M. Mugur-Schächter, École des Mines, Paris, 5 juin.

— « Anticipation et protension : un essai de confrontation entre la physiologie de l'action et la phénoménologie de la temporalité chez Husserl », Conférence

au Colloque transdisciplinaire sur « l'Anticipation » organisé par l'EA 340, Institut de Phonétique de Strasbourg, Université Marc Bloch, Strasbourg II, 19-21 novembre.

— « Quelques apories (anciennes et modernes) du mouvement dans les neurosciences contemporaines », Conférence à la Journée de Conférences-Débats du réseau CogniSud, organisé par Bruno Gepner « Relations esprit-cerveau : questions, problèmes, idées » Agora des Sciences, Marseille, 28 novembre.

— « Une perspective de réconciliation du naturalisme avec le transcendantal », Conférence au Séminaire d'Epistémologie des Sciences Cognitives, Dir. Jean-Michel Roy, École Normale Supérieure (LSH) de Lyon, 4 décembre.

— Conférence à l'Espace Culture de l'Université des Sciences et Technologies de Lille : « Émotions et cerveau », Cité scientifique de Villeneuve d'Ascq, 9 décembre.

— « Neuroscienze e teoria husserliana della costituzione », Conférence au Congrès international « Linguaggio e pensiero : un confronto tra semiotica, fenomenologia e ricerche cognitive », Università degli Studi di Napoli Federico II, Naples, 15-16 décembre.

RONDI-REIG, L. :

— « Les dysfonctionnements de la mémoire spatiale », Congrès Psy & SNC 2003, Psychiatrie et cerveau : vers une intégration des théories, Les modèles animaux et psychiatrie, Paris, 7 novembre.

SENOT, P. :

— « Bases neurales de l'anticipation pour l'interception d'un objet en chute libre », Programme de la Journée scientifique de l'IFR49, Institut d'Imagerie neurofonctionnelle, Domaine de St Paul, St-Remy-lès-Chevreuse, 11 décembre.

VIDAL, M. :

— École Thématique Interdisciplinaire du CNRS « Réalité Virtuelle et Sciences du Comportement », Jardin du Pharo, Marseille, 19-23 mai.

WIENER, S. :

— « Élaboration et exploitation des représentations de la position de la tête dans l'espace : Enregistrement des neurones du thalamus limbique, de l'hippocampe et des ganglions de la base », 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, 23 septembre.

— Les bases neuronales de la cognition spatiale : Enregistrement chez l'animal libre de ses mouvements, Laboratoire de Neurobiologie, UMR 8544, École Normale Supérieure, Paris, 11 juin.

2004

BERTHOZ, A. :

— « La désorientation spatiale », Séminaire Neurologie et Psychiatrie « Substrats neurofonctionnels des comportements et des émotions », Chamonix, France, 23 janvier.

— « Base neurale de la mémoire spatiale : Poincaré avait-il raison ? », Colloquium de l'École Normale Supérieure, École Normale Supérieure, Paris, 10 février.

— « Symétries et asymétries dans la perception du corps propre et de l'espace », Journée de travail inter-universitaire « La notion de symétrie : un paradigme interdisciplinaire », Université Jussieu, Paris, 18 mars.

— « Differential role of left and right hippocampal formation in spatial memory and mental manipulation of points of views », 1^{er} Congrès Européen de Neurophysiologie, Modena, Italie, 20 avril.

— Meeting Neurobotics the fusion of Neurosciences and Robotics for augmenting human capabilities, « Perception and action : the sense of motion », Collège de France, LPPA, 10 mai.

— « Multisensory integration for spatial orientation », The 3rd Peter Wallenberg Symposium Sensing and Feeling : Interpreting the world through natural and artificial senses, Hanaholmen, Helsinki, Finlande, 27 mai.

— Conférence à l'Université de la Caisse des Dépôts et consignation (4 conférences) « La Décision », mai-juin.

BULLOT, N.J. :

— « L'accès épistémique aux objets physiques : Étude des routines attentionnelles constitutives de la référence déictique », Colloque jeunes chercheurs en philosophie, Langage, connaissance et action, Campus de Beaulieu, Rennes, 5-7 février.

— « Auditory and cross-modal attention for the deictic "anchoring" of the mind on individual objects », Meeting Philosophy and sound, University of London, School of Advanced Studies, co-organised by Birbeck College and Institut Nicod, 31 janvier.

DROULEZ, J. :

— « Modèles de la perception du mouvement et des objets ». Séminaire de la Chaire de Communications Cellulaires (J.P. Changeux), Collège de France, Paris, mai.

— « Modélisation Bayésienne : de la psychophysique à la biophysique ». Séminaire du Laboratoire de Neurophysique et Physiologie du Système moteur, mai.

— « Fusion 2D/3D ». Séminaire Images Virtuelles Renault, Collège de France, Paris, janvier.

GRAF, W. :

— Discussion sur « Réseaux corticaux de l'attention et de l'intention », Collège de France, Paris, 3 mars.

— Conférence « L'anatomie fonctionnelle du système vestibulaire », Symposium Cent ans après Jules-Étienne Marey : Aspects de la morphologie fonctionnelle aujourd'hui (Armand de Ricqlès, Chaire de Biologie Historique et Évolutionnisme), Collège de France, Paris, 29/30 avril.

KAPOULA, K. :

— « Base physiologiques et physiopathologiques de l'oculomotricité », Club des ganglions de la base et des mouvements anormaux, Bordeaux, 3-4 février.

— « Influence contextuelle de la stimulation transcrânienne magnétique sur la latence des saccades et de la vergence », Club de neuro-ophtalmologie franco-lyonnaise, Lyon, 30 janvier.

MILLERET, C. :

— « L'imagerie optique : une approche novatrice du fonctionnement du cortex visuel ». Chaire de Neuropharmacologie, (invitants : J. Glowinski & C. Giaume), Collège de France, Paris, 29 mars.

PETIT, J.-L. :

— « Attention, intention et intentionnalité », Discutant de Ian H. Robertson au Séminaire du Cours du Pr A. Berthoz, Collège de France, 14 janvier.

RONDI-REIG, L. :

— « Comprendre comment on s'oriente dans l'espace : l'intérêt des modèles animaux », Institut Fédératif de Recherche Broca Sainte-Anne (affection du système nerveux central), Paris, France, 7 mai.

— « Testing for spatial navigation mechanisms using conditional mutagenesis », Laboratory of Pr Petrosini, Department of Psychology, University of La Sapienza, Rome, Italie, 14 avril.

— « Testing for episodic-like memory disorders using conditional mutagenesis », Atelier de formation Inserm, Génétique et comportement de la souris, Montpellier, France, 29-30 avril.

VIDAL, M. :

— « Navigating in a virtual 3D maze : Body and gravity, two possible reference Frames for perceiving and memorizing », 5th Annual meeting of the International Multisensor Research Forum, Barcelona, Espagne, 2-5 juin.

— « Can Haptic Feedback Improve the Perception of Self-Motion in Virtual Reality ? », 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, Illinois, USA, 27-28 mars.

WIENER, S. :

— « Multisensory and motor integration in the elaboration of position and head direction responses in limbic neurons », Center of Navigation and Communication Sciences et Dept of Neurobiology & Anatomy, Université de Rochester, NY, USA, 19 février.

— « Brain mechanisms for elaborating and exploiting abstract spatial representations », International Symposium on Cognitive and Emotional Neuroscience, Toyama, Japon, 5 mars.

Communication avec actes

2003

— BERTIN, R.J., ISRAËL, I. & BERTHOZ, A. : Poster, N° 26 « Visuo-vestibular interaction(s) in the reconstruction of passively traveled maneuvers ». 26^e Conférence Européenne sur la Perception Visuelle : Action, Self-motion, Optic flow and Space perception, Université R. Descartes, Paris.

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

— BURGUIÈRE, E., RUTTEMAN, M., DE ZEEW, C.I., BERTHOZ, A., WIENER S.I. & RONDIREIG, L. : « Rôle du cervelet dans l'orientation spatiale : études comportementales de souris transgéniques L7-PKCI ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— BUZAS, P., ROCHEFORT, N., MILLERET, C., EYSEL, U.T. & KISVARDAY, Z.F. : « An optical imaging analysis of the role of the corpus callosum in the formation of cortical maps in the normal adult cat ». Hungarian Vision Symposium, Hongrie.

— COMMITTERI, G., GALATI, G., PARADIS, A.-L., PIZZAMIGLIO, L., BERTHOZ, A. & LEBIHAN, D. : « Egocentric and Allocentric Spatial Coding in a 3D Environment ». Neuroimage : p. 380 (2003). Ninth Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping.

— CORNILLEAU-PERES, V., WONG, T.K., CHEONG, L.F. & DROULEZ, J. : « Visual perception of a single plane during sagittal head motion ». ECVP2003, Perception 32 (supplement) 11, Paris.

— DÉJEAN, C., ZUGARO, M.B., ARLEO, A., BURGUIÈRE, E. & WIENER, S.I. : Poster H-25 : « Des signaux visuels dynamiques décident quels repères visuels mettent à jour les cellules de direction de la tête chez le rat ». 6^e Colloque Soc. Neurosci., Rouen, France.

— DÉJEAN, C., BOUCHENY, C., ARLEC, A., ZUGARO, M.B., BURGUIÈRE, E., BRUNEL, N. & WIENER, S.I. : « Influence des informations multisensorielles sur l'acti-

tivité des cellules de direction de la tête chez le rat : Étude électrophysiologique et modélisation neuromimétique ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— GRANTYN, A., KUZE, B., BRANDI, A.M. & THOMAS, M.A. : « Contribution des neurones omni pauses pontins (OPN) à la coordination œil-tête chez le chat ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— HICHEUR, H., VIELLEDENT, S., RICHARDSON, M.J.E. & BERTHOZ, A. : « Control of trajectories during human locomotion along complex curved paths ». European Workshop on Movement Science, Münster, Germany.

— ISRAËL, I., LECOQ, C. & CAPELLI, A. : « Y-a-t-il vraiment une interdépendance entre temps et mouvement propre ? ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— ISRAËL, I. : Poster N° 8 « Visuo-spatial memory in dancers : Selection of the reference frame ». 26^e Conférence Européenne sur la Perception Visuelle : Action, Self-motion, Optic flow and Space perception, Université R. Descartes, 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.

— KAPOULA, Z., YANG, Q. & ORSSAUD, C. : « Anomalies des mouvements oculaires dans l'espace tridimensionnel chez les sujets âgés présentant des antécédents de chute ». Congrès franco-suisse de Strabologie, Genève, Suisse.

— KHAMASSI, M., GIRARD, B., GUILLOT, A. & BERTHOZ, A. : « Mécanismes neuromimétiques d'apprentissage par renforcement dans l'architecture de contrôle du rat artificiel Psikharpax ». Poster presented at the french conference on artificial learning within the frame of the AFIA platform, Laval, France.

— KHAMASSI, M., GIRARD, B., BERTHOZ, A. & GUILLOT, A. : « Mécanismes neuromimétiques d'apprentissage par renforcement dans l'architecture de contrôle du rat artificiel Psikharpax ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— KLAM, F. & GRAF, W. : « Vestibular signals in posterior parietal cortex neurons of macaque monkeys during active head movements ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— KLAM, F. & GRAF, W. : « Active and passive head movement encoding by posterior parietal cortex neurons of macaque monkeys : vestibular signals ». Soc. Neurosci., Abstr. 29 : 268.3.

— LAMBREY, S., SAMSON, S., DUPONT, S., BAULAC, M. & BERTHOZ, A. : « Reference frames and cognitive strategies during navigation : is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory ? ». International Congress Series, Volume 1250, pp. 261-274.

— 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 1st International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, Capri, Italy.

— MILET, A., RONDI-REIG, L., TURIAULT, M., SAHLY, I., LAZAR, M., BERTHOZ, A. & TRONCHE, F. : « Étude de la fonction du récepteur des glucocorticoïdes dans les mécanismes d'apprentissage et de mémoire ». 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.

— ROCHEFORT, N., BUZAS, P., KISVARDAY, Z.F., EYSEL, U.T. & MILLERET, C. : « Caractéristiques anatomo-fonctionnelles des connexions calleuses dans le cortex visuel primaire du chat ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— ROCHEFORT, N., BUZAS, P., KISVARDAY, Z.F., EYSEL, U.T. & MILLERET, C. : « Caractéristiques anatomo-fonctionnelles des connexions calleuses dans le cortex visuel primaire du chat ». École d'été dans le cadre de l'ACI « Neurosciences Intégratives et Computationnelles », Concarneau, France.

— ROCHEFORT, N., BUZAS, P., KISVARDAY, Z.F., EYSEL, U.T. & MILLERET, C. : « Étude par imagerie optique des caractéristiques anatomo-fonctionnelles des connexions calleuses dans le cortex visuel du chat ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— RONDI-REIG, L., PETIT, G., TOBIN, C., TONEGAWA, S., MARIANI, J. & BERTHOZ, A. : « Behavioral strategies of CA1 NMDA receptors knock-out mice during spatial orientation in a new task : the "starmaze" ». 35th annual general meeting of the European brain and behaviour society, Acta Neurobiologiae experimentalis, vol 63, L67, Barcelone, Espagne.

— 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.

— TZELEPI, A., LUTZ, A. & KAPOULA, Z. : « Activation EEG liée à la préparation et à la suppression des mouvements des yeux dans l'espace 3D ». Journée

de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique : Collège de France, Paris.

— VALLET, M., PAILLÉ, D., MONOT, A. & KEMENY, A. : « Ecological model of glittering texture ». Proceedings of SPIE, Human Vision and Electronic Imaging VIII, pages : 310-320.

— WIENER, S.I. : « How the brain constructs and exploits stimulus invariant representations of the position and orientation of the head in space », EuroCogsci03, Osnabruck, Allemagne.

— YANG, Q., BUCCI, M.P. & KAPOULA, Z. : « Développement des caractéristiques des saccades et de la vergence chez l'enfant ». Journée de l'Institut de Biologie et de l'Institut fédératif de recherche 52 : Transduction de signaux. Molécules à l'Action Centrale et Périphérique, Collège de France, Paris.

— ZUGARO, M.B., ARLEO, A., DEJEA, C. & WIENER, S.I. : « Dynamic visual signals are crucial for the selection of anchoring distal cues by anterodorsal thalamic head direction cells ». Program No. 519.16. 2003 Abstract Viewer/Itinerary Planner. Society for Neuroscience, Washington, DC, USA.

2004

— BULLOT, N., DROULEZ, J., MORVAN, C. & PYLYSHYN, Z. : « Keeping track of objects while exploring a spatial layout with partial cues : location-based and direction-based strategies ». Vision Sciences Symposium 2004, Sarasotha, Florida, USA.

— BURGUIÈRE, E., RUTTEMAN, M., DE ZEEUW, C., BERTHOZ, A., WIENER, S. & RONDIREIG, L. : « Role of the cerebellum during navigation : behavioural studies with transgenic L7-PKCI mice », Creating coordination in the cerebellum, The cerebellum, vol 3, p. 41, Catania, Italy.

— DROULEZ, J. & LAURENS, J. : « To spike or not to spike : a biophysical model of decision process ». BIBA Winter school, Combloux, France.

— GIRARD, B., FILLIAT, D., MEYER, J.-A., BERTHOZ, A. & GUILLOT, A. (2004) : An integration of two control architectures of action selection and navigation inspired by neural circuits in the vertebrates : The Basal ganglia. In H. Bowman and C. Labiouse (Eds). Connectionist Models of Cognition and Perception II, Proceedings of the Eighth Neural Computation and Psychology Workshop, pp. 72-81, World Scientific.

— HICHEUR, H., VIEILLEDENT, S. & BERTHOZ, A. : « Influence of the geometrical properties of the path on the anticipatory head orientation mechanism during human locomotion ». Neural Control of Movement Meeting, Sitges, Spain.

— KHAMASSI, M., GIRARD, B., BERTHOZ, A. & GUILLOT, A. : « Comparing three Critic models of reinforcement learning in the basal ganglia connected to a detailed actor part in a S-R task ». Proceedings of the Eighth International Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS-8, Amsterdam, The Netherlands.

— LECUYER, A., VIDAL, M., JOLY, O., MAGARD, C., BERTHOZ, A. : « Can Haptic Feedback Improve the Perception of Self-Motion in Virtual Reality ? », 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Chicago, Illinois, USA, 27-28 mars.

— MORVAN, C. & WEXLER, M. : « The detection of motion in any reference frame ». ECVP 2003, Perception, vol. 32 supp., Paris, France.

— MORVAN, C. & WEXLER, M. : « Motion detection by active observers ». VSS 2004, Sarasotha, Florida, USA.

— ROCHEFORT, N., BUZAS, P., KISVARDAY, Z.F., EYSEL, U.T. & MILLERET, C. : « Optical imaging of the layout of callosal activity in the cat primary visual cortex ». FEBS, Lisbonne, Portugal.

— SENOT, P., LE SEAC'H, A., PRÉVOST, P. & MCINTYRE, J. : « Does the brain model the laws of Physics ? On catching and intercepting flying objects ». First France-Japan joint symposium on motor control, New perspectives of Human Movement Sciences, Tokyo, Japan.

— SENOT, P., BAILLET, S., RENAULT, B. & BERTHOZ, A. : « Fast neuromagnetic responses in catching a free falling ball ». Second annual meeting about EEG dipole tracing methods, Tokyo, Japon.

— SENOT, P., LE SEAC'H, A., PRÉVOST, P. & MCINTYRE, J. : « Influence de la direction de la trajectoire pour l'interception d'une balle en realite virtuelle ». 6^e colloque de la Société des Neurosciences, Rouen, France.

— WIENER, S.I., ARLEO, A., DÉJEAN, C., BOUCHENY, C., KHAMASSI, M. & ZUGARO, M.B. : « Optic field flow signals update the activity of head direction cells in the rat anterodorsal thalamus ». Proceedings of the 4th Forum of European Neuroscience, FENS 2004, vol. 2, A007.19, Lisbon, Portugal.

Organisations de Réunions

2003

BERTHOZ, A. :

— Colloque Autisme, cerveau et Développement : de la recherche à la pratique. Collège de France, Paris, 24-25 juin (500 participants).

— Symposium « Les Espaces de l'Homme », Collège de France, Paris, 14-15 octobre (500 participants).

DROULEZ, J. :

— 26th European Conference on Visual Perception : Multisensory and sensorimotor interactions, Paris, 1^{er} au 5 septembre 2003.

KEMENY, A. :

— DSC2003 « Driving Simulation Conference North America » : Conférence Internationale sur la simulation de conduite, Dearborne, Michigan, USA, septembre 2003.

- Séminaire : « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, juin 2003.
- Séminaire : « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, janvier 2004.

2004

BERTHOZ, A. :

— École d'été du programme de l'ACI de Neurosciences Intégratives et Computationnelles, Concarneau, août 2003.

— Colloque Neurobotics the fusion of Neurosciences and Robotics for augmenting human capabilities, Collège de France Paris, 10-13 mai.

WEXLER, M. :

— Journée « Gestion des changements de point de vue », Collège de France, Paris, 5 mai 2004.

Enseignement

BERTHOZ, A. :

— DEA de Neurosciences, Paris VI.

— DEA de Sciences Cognitives, EHESS, Paris VI.

— Séminaire en Sciences Cognitives à l'École Polytechnique, Palaiseau.

BUCCI, M.P. :

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

DROULEZ, J., WEXLER, M. & PARADIS, A.-L. :

— Atelier de Formation MEG-EEG et IRMf (22-26 septembre 2003) : Protocoles Expérimentaux.

— DEA de Sciences Cognitives (EHESS, ENS, Polytechnique, Paris VI).

— DEA de Neurosciences (Paris VI).

GRAF, W. :

— Module d'enseignement « Organisation sensorimotrice » : « Évolution des systèmes sensorimoteurs ». École doctorale BMIC.

— DEA de Neurosciences, Université Lyon 1.

KAPOULA, Z. :

— Maîtrise d'Optique Physiologique, d'optique de contact et d'optométrie, Univ., Paris XI.

— Diplôme Universitaire Sciences de la Vision, 2^e cycle, Orsay, Paris XI.

KHAMASSI, M. :

— Licence de Sciences Économiques, La Sorbonne, Université de Paris I, février à mai 2004, TD de Bases de Données.

— Master de BioInformatique IIE-CNAM, Université d'Évry, TP Java Encadrement de Projet : Programmation d'automates pour la recherche de motifs dans une séquence ADN, octobre 2003.

McINTYRE, J. :

— DEA de Physiologie et Biomécanique de la Performance Motrice, Option « Biomécanique et Physiologie du Mouvement », Université de Paris 6 (1999-présent).

MILLERET, C. (2003-2004) :

— 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 DU de Strabologie « Le système visuel des Primates » et « Le développement du système visuel ».

— Hôpital des Quinze-Vingts : Cours magistral dans le cadre du diplôme Inter-universitaire de Posturologie Clinique « Troubles oculomoteurs, corps calcaux et posture ».

PETIT, J.-L. :

— Mission du Ministère des Affaires Étrangères pour une semaine de cours avec examen : Les bases du rapport social, Université de Marmara, Istanbul, Turquie, 23/02-7/03/2004.

Participation à l'organisation de la recherche

BERTHOZ, A. :

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

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

— Membre du Conseil scientifique du Département des Sciences de la Vie du CNRS.

DROULEZ, J. :

— Animation du Réseau Thématique Pluridisciplinaire, N° 15 de département STIC du CNRS, Organisation de l'Action Spécifique sur les changements de point de vue.

KHAMASSI, M. :

— Organisation du 3^e Forum des Laboratoires en Sciences Cognitives, Paris, France, 2 juin 2004.

McINTYRE, J. :

— Co-responsable de l'atelier « Club Mouvement », Ile de France (2000-présent).

— Comité de pilotage, RTP 15 « Interfaces médiatisées et Réalité Virtuelle » (2003).

MILLERET, C. :

— 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 coopté 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. :

— Membre du Conseil d'Établissement du Collège de France.

Collaboration avec l'Industrie

BERTHOZ, A. :

— Contrats européens ULTIMATE et CLARESCO avec Renault (A. Kemeny).

— Contrat avec la Société Peugeot.

DROULEZ, J. :

— Contrats Cifre et collaborations avec Renault (Andras Kemeny) : perception haptique et utilisation des textures de normales.

— Contrats d'étude avec EDF (Guillaume Thibault) : visualisation de données 3D, modélisation de nuages de points, fusion 2D/3D.

KEMENY, A. :

— 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.

McINTYRE, J. :

— Développement d'un système opto-inertiel de mesure des mouvements avec InterSense (Boston, USA), Charnwood Dynamics (Leicester, UK) et le CNES (1999-présent).

Contrats de recherche et coopérations internationales

BERTHOZ, A. :

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

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

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

— 2062 : Projet SENS avec le CNRS.

— 2063 : Projet « Asymétries cranio-faciales », Fondation Cotel-Académie des Sciences.

— 2064 : Projet HUPER du programme de Robotique ROBEA du CNRS (avec le CEA Fontenay, M^{me} Pissaloux).

DROULEZ, J. :

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

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

— ACI Neurosciences intégratives et computationnelles, Modèle multi-sujet de la dynamique neuronale du liage perceptif. Acquisition IRMf-EEG simultanée et IRM de diffusion. Responsable scientifique : J.-B. Poline, SHFJ-CEA, Orsay.

— ACI Neurosciences intégratives et computationnelles : Développement de l'intégration interhémisphérique des informations visuelles par le corps calleux chez les mammifères supérieurs. Responsable scientifique : Chantal Milleret (LPPA).

KAPOULA, Z. :

— Responsable des coopérations européennes bilatérales avec la Faculté Polytechnique, Université de Kaunas, puis avec l'Université de Siauliai, département d'électronique & informatique et de radio-ingénierie, Lituanie (programme CNRS/DRI/PECO).

— Responsable d'une coopération européenne bilatérale avec le group Cognition & Action, département de Neurologie, Université Nationale d'Athènes (CNRS/DRI/PLATON).

— Contrat Européen Eurokinesis coordonné par W. Graf (Eurokinesis, OLRT — 2000 00 442, FP5PRTD).

— Contrat CNRS/STIC, CTI Handicap.

McINTYRE, J. :

— Projet Européen (6th Framework Programme) « Neurobotics » avec Scuola Superiore Sant'Anna (coordinateur), Pise, Italie (2004-2008).

— Projet « ECoViA » (Étude du Couplage Visio-hAptique) dans le cadre du programme ROBEA (2003-2005).

— Projet « Effects of change of gravity on eye-hand coordination, with applications to robotics » avec l'Université Catholique de Louvain et l'ESA (2003-présent).

— Laboratoire Européen de la Neurosciences de l'Action avec la Fondation IRCCS Santa Lucia, Rome, Italie (1998-présent).

— Projet « VOILA » (Visuo-Optical Interactions for Long-term Astronauts), avec le CNES, la NASA et le Center for Space Research, MIT, Cambridge, USA (1999-présent).

— Projet « NeuroCOG », collaboration à bord de la station internationale avec le CNES, l'ESA et l'Université Libre de Bruxelles (2002-présent).

— Projets « COSMIC » et « SENS » avec le CNES (2000-présent).

MILLERET, C. :

— 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).

— ACI « Neurosciences Intégratives et Computationnelles : Cerveau et Temps ». Projet (2003-2005) avec U.T. Eysel, Z. Kisvarday, J. Droulez & D. Bennequin (C. Milleret, coordinatrice).

Thèses et Diplômes

DEA :

FERRUFINO, L. (2004), DEA de Physiologie et Biomécanique, Université Paris V. (Z. Kapoula).

FOUBERT, L. (2003), DEA de Sciences Cognitives, Université de Paris VI. (C. Milleret).

FRESLIER, M. (2004), DEA de Physiologie et Biomécanique de l'Homme en mouvement, Université Paris VI. (A. Berthoz).

KHAMASSI, M. (2003), DEA de Neurosciences, Université Paris VI. (S. Wiener).

LAFON, M. (2004), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI-EHESS. (A. Berthoz).

LEHMANN, A. (2004), DEA de Sciences Cognitives, Université Paris VI. (A. Berthoz).

POUVREAU, N. (2004), DEA de Biologie du Vieillessement, Université Paris V-VII. (Z. Kapoula).

THIRIOUX, B. (2004), DEA de NeuroPsychologie, Université Paris VI. (A. Berthoz).

WEINER, V. (2003), DEA de Sciences Cognitives, Université de Paris VI. (J. Droulez).

Thèses

GIRARD, B. (2003) : Thèse Spécialité Informatique : « Intégration de la navigation et de la sélection de l'action dans une architecture de contrôle inspirée des ganglions de la base », soutenue le 12 septembre, Université Paris VI. Direction Dr A. GUILLOT et le Pr A. BERTHOZ.

SENOT, P. (2003) : Thèse de Biomécanique et de Physiologie du Mouvement : « Mécanismes et bases neurales de l'anticipation pour l'interception d'un objet accéléré » soutenue le 2 octobre, Université Paris-Orsay XI. Direction Pr A. BERTHOZ et J. MCINTYRE.

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

TOFFIN, D. (2003) : Thèse en Sciences Cognitives. « Caractérisation des informations haptiques liées aux applications de simulation en réalité virtuelle », soutenue le 4 décembre, Université Paris VI. Direction J. MCINTYRE, A. KEMENY et J. DROULEZ.

Distinctions

A. BERTHOZ :

— Élection à l'Académie des Sciences. Institut de France

— Officier de l'Ordre national du Mérite.