

Physiologie de la perception et de l'action

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

Le cerveau et les espaces Résumé du cours 2007

Après un hommage à la mémoire de Jacques Paillard, grand pionnier des sciences cognitives et du rapprochement entre les approches analytiques et comportementales, le premier cours a été consacré aux fondements de la notion d'espace et à la question : ces fondements sont-ils issus de l'axiomatique ou de l'architecture du système nerveux, ou encore de l'expérience sensible ?

Nous avons d'abord rappelé la multiplicité des espaces depuis celui des gènes, des molécules, des réseaux neuronaux, du corps, jusqu'aux espaces abstraits des mathématiques et de la logique. L'idée ici est qu'il faut parler des espaces au pluriel et mettre en cause la notion d'un espace au singulier. Un rappel des grandes théories sur la notion d'espace depuis les Grecs nous a permis de résumer l'opposition entre les notions *d'espace absolu*, défendues par Newton par exemple, et *d'espace relatif* en mentionnant les débats historiques auxquels ont participé Leibniz, Berkeley, etc. jusqu'aux contributions de grands physiciens comme Maxwell qui fut un des premiers à introduire le rôle potentiel du corps sensible dans l'élaboration de la notion d'espace. Puis les prises de position très claires de Poincaré et Einstein pour une prise en compte de l'expérience sensible et de l'action dans la genèse de la géométrie ainsi que la controverse entre Hilbert et Pash d'un côté et Brouwer et les courants intuitionnistes de l'autre sur ce sujet. Pour clore ce rappel, nous avons mentionné les positions de Granger, qui enseigna au Collège de France, décrites dans son livre « La pensée de l'espace » ainsi que le livre publié par Longo *et al.* en 2004 sur « Géométrie et Cognition ».

Une des questions fondamentales qui intéressent la physiologie est celle qui concerne la géométrie, ou les géométries qu'utilise le cerveau pour la perception et l'action. Koenderink, par exemple, a suggéré que la vision travaille dans une géométrie non euclidienne. Plus récemment, le géomètre B. Tessier a suggéré

que le concept de ligne est un des fondements de la pensée de l'espace. Il viendrait d'une construction proto-mathématique de notre système perceptuel. Notre système perceptif reconnaîtrait deux sortes de lignes différentes : la « ligne visuelle » et la « ligne vestibulaire ». Pour B. Tessier la « ligne » mathématique serait le résultat de l'identification de la « ligne visuelle » avec la « ligne vestibulaire ». Il appelle cette transformation l'« isomorphisme Poincaré-Berthoz », faisant allusion aux travaux de notre laboratoire sur la perception vestibulaire des rotations et des translations.

Le reste du cours a été consacré à une illustration de la variété des espaces. Nous avons d'abord rappelé les travaux de Piaget qui montra la succession des appréhensions de l'espace au cours du développement et proposa que le cerveau de l'enfant utilise successivement plusieurs géométries. Puis nous avons illustré cette variété par des exemples empruntés à la neuropsychologie (qui distingue l'espace corporel, extracorporel, environnemental), l'imagerie cérébrale, qui a montré que le cerveau utilise des réseaux différents pour l'espace proche et lointain pour la mémoire spatiale égocentrée et allocentrée, le traitement des formes naturelles (animaux, visages) et environnementales (bâtiments, etc.).

Nous avons ensuite abordé le problème de la multiplicité des référentiels et proposé l'hypothèse de la flexibilité des référentiels, en insistant sur le fait que le cerveau peut choisir un référentiel suivant la tâche, et pendant un mouvement il peut changer de référentiel d'une phase à l'autre du mouvement. La multiplicité permet de choisir le référentiel le plus adapté (cf. Poincaré « La géométrie euclidienne est la plus commode ») (A. Berthoz) in J. Paillard. *Brain and Space* (1999), *Reference frames for the perception and control of movement*, 81-111. Le problème n'est donc pas seulement la cohérence mais la dynamique des changements de référentiels. Enfin, sur l'exemple des bases neurales du regard, nous avons décrit des travaux récents du laboratoire sur le problème de la géométrie des cartes visuelles à la fois dans le cortex visuel et le colliculus. Enfin, nous avons insisté sur le fait que le cerveau impose au monde ses grilles d'interprétation comme en témoignent les illusions perceptives et des données récentes comme par exemple le fait que le système visuel de forme et de mouvement coopère pour créer des groupements des caractéristiques d'objets en mouvement qui n'existent pas au plan de la rétine pour maintenir l'identité des objets perçus pendant leur mouvement.

Le deuxième cours a porté sur la question de l'accès conscient et inconscient aux espaces. Pour comprendre les fondements de la notion d'espace, il est important de noter que la spatiation est une propriété fondamentale de toute l'organisation du vivant. Par exemple, dans son livre « Les anatomies de la pensée », Alain Prochiantz a noté que « les gènes de développement des parties du corps sont disposés sur le chromosome de façon ordonnée co-linéaire » avec l'organisation spatiale qu'auront les parties du corps. On peut parler d'un « homonculus génétique ». Les contraintes de temps et d'espace imposées dans l'expression des gènes homéotiques introduisent dans le génome une dimension

spatio-temporelle. Les quatre homonculus génétiques ne sont pas unidimensionnels, mais bien riches des quatre dimensions de l'espace et du temps. Il soutient donc que l'information spatiale est primordiale... et que la différenciation du cerveau antérieur a répondu à la nécessité de lier des réflexes d'ordre sensori-moteurs (*dont le code est spatial*) à d'autres modalités sensorielles... la vue, l'ouïe et l'odorat. On trouverait par conséquent des « homonculus » déformés qui ont un rapport avec l'homonculus génétique représenté sur le génome sous la forme, dans le cas des vertébrés, des quatre complexes HOX. Mais ce liage n'est pas seulement assuré par des correspondances entre les « topies », les cartes dans le cerveau, il est aussi assuré par l'existence de modèles internes des propriétés des capteurs et des lois de la physique du monde. Nous avons décrit quelques exemples de ces modèles internes et leur rôle dans l'intégration multi-sensorielle. Le liage est aussi assuré par la synchronisation temporelle des activités dans différentes aires. Mais le traitement de l'espace n'exige pas des entrées sensorielles : on peut imaginer une scène visuelle. Une question intéressante est par conséquent de savoir si les mêmes aires du cerveau sont impliquées dans la perception et dans l'imagination de l'espace ? Nous avons décrit les résultats d'expériences d'imagerie cérébrale sur cette question. L'imagerie mentale de l'espace et la perception visuelle impliquent des aires en partie communes, le recouvrement est toutefois plus particulièrement marqué dans les aires frontales plutôt que dans les aires temporales et occipitales. Il est donc probable que ces deux modes de traitement impliquent des processus différents. Mais c'est la région antérieure qui est impliquée dans l'imagerie mentale et la région postérieure dans la mémoire épisodique. Il faut donc aujourd'hui regarder de très près les divisions des aires cérébrales car leurs parties sont peut-être impliquées dans des processus et des réseaux fonctionnels différents. La modularité du traitement des espaces est illustrée aussi par le fait que des aires très différentes traitent les visages (fusiforme), les environnements (parahippocampe). Une région du cortex extra strié (EBA) est spécialisée dans la perception des formes des parties du corps humain. Elle est activée à la fois pendant la perception visuelle des actions d'autrui ou de soi, mais aussi lors de mouvements sans vision. Mais il ne suffit pas de connaître les aires impliquées dans la perception de l'espace, il faut aussi connaître celles qui sont impliquées dans la manipulation mentale de l'espace. Enfin la dernière partie de ce cours a été consacrée à la conscience du corps en acte c'est-à-dire du corps situé dans des espaces de vie. Déjà Penfield avait décrit le rôle du cortex temporal dans des expériences de « déjà vu et déjà vécu » qui supposent la reconstruction par le cerveau du corps dans un contexte spatial et des expériences de « sortie du corps ». Une littérature importante porte aussi sur l'héautoscopie. Récemment de nombreuses expériences ont montré l'importance d'une région, l'aire pariéto-temporale, que notre laboratoire a identifiée comme aire « vestibulaire » dans les processus qui permettent la cohérence des perceptions des rapports de notre corps avec l'espace. Quels peuvent être les mécanismes de la construction de la cohérence consciente du corps propre et du corps vécu ? **Le corps est dans le monde et il est perçu par une série de**

visées successives qu'il faut lier. L'émergence de représentations unifiées peut résulter de l'activité synchrone de populations de neurones distants. C'est le liage temporel qui compense l'éclatement des représentations du corps dans de nombreux centres du cerveau. Certains modèles de la conscience impliquent des réseaux de neurones « cortico-corticaux » mais nous avons plutôt insisté dans ce cours sur la multiplicité des processus conscients et montré des données neurologiques d'une « conscience sans cortex » à l'appui de thèses comme celle de Zeki sur l'absence d'unité de la conscience de soi.

Le troisième cours a été consacré à la **pathologie psychiatrique de l'appréhension de l'espace**. En effet, il apparaît que la plupart des malades neurologiques et psychiatriques présentent des troubles liés à la manipulation mentale des espaces corporel, extracorporel, environnemental, etc. Par exemple, la négligence spatiale due à une lésion du cortex pariétal droit, les agnosies liées au corps propre auto-topo-agnosie, somato-topo-agnosie, hétéro-topo-agnosie ; les agnosies dimorphiques (perception du corps déformée), la somato-paraphrénie, la simultan-agnosie, les hallucinations corporelles, l'autoscopie, l'hé-autoscopie. Il faut aussi mentionner l'anxiété spatiale, l'agoraphobie, les déficits de la mémoire topographique, kinesthésique, autobiographique, etc. On observe des dissociations importantes qui révèlent le fait que des réseaux distincts sont impliqués dans ces pathologies. On a pu identifier une dissociation entre la reconnaissance de son corps et le corps d'autrui, comme le montre l'exemple de deux patients : JR ne peut pointer vers les parties de SON corps mais peut pointer vers les parties du corps d'autrui (lésion pariétale supérieure gauche), c'est un cas d'auto-topo-agnosie et AP ne peut pointer vers les parties du corps d'autrui mais peut pointer vers les parties de son propre corps (lésion pariétale inférieure gauche), c'est un cas d'hétéro-topo-agnosie ou trouble de la désignation (Degos). Ceci suggère que le cortex pariétal supérieur gauche serait impliqué dans le traitement des informations concernant le corps propre, et le cortex pariétal inférieur gauche traiterai le corps d'autrui. Nous avons approfondi le rôle de la jonction temporo-pariétale (JTP) déjà mentionné au cours précédent. Penfield lui avait attribué un rôle essentiel dans « la conscience » (« awareness ») du corps et des relations spatiales. Des sujets épileptiques chez qui le foyer est situé dans la JTP éprouvent des expériences de sortie du corps. Par stimulation magnétique transcranienne de la JTP on peut induire des expériences de sortie du corps mais aussi d'autres modifications de la perception du corps propre. La JTP est aussi activée lorsqu'on demande à des sujets normaux d'imaginer des sorties du corps ; elle n'est pas activée pour la manipulation mentale des objets. Cette région qui comprend le « cortex vestibulaire » est une aire multisensorielle parce que l'entrée « vestibulaire » est elle-même multisensorielle. En plus de la JTP, des aires du lobe temporal impliquées dans l'orientation spatiale et la perception du mouvement propre ont été identifiées tout le long du sillon temporal supérieur. Nous avons nous-mêmes, en relation avec des épiléptologues, montré que ces régions sont impliquées dans la construction de la cohérence du corps propre. Ces découvertes

sont importantes car elles établissent un lien entre neurologie et psychiatrie. En effet, le sillon temporal supérieur est le siège d'activités concernant les relations avec autrui. J'ai suggéré que les autistes ont des difficultés à construire la cohérence entre leur corps propre et le monde et proposé l'hypothèse que les difficultés de communication avec autrui chez ces patients sont en partie liées à ces difficultés pour construire une identité du corps propre et pour manipuler les relations spatiales avec autrui. L'hypothèse que ces régions sont importantes pour l'autisme est appuyée par les travaux qui montrent une hypoperfusion temporale et une diminution de la substance grise bi-temporale. Nous avons ensuite évoqué le syndrome des asymétries craniofaciales qui provoquent, elles aussi, des troubles de l'orientation spatiale et nous avons décrit les résultats nouveaux obtenus par IRM sur l'anatomie des canaux semi-circulaires qui révèlent des anomalies que nous supposons à l'origine de certains déficits dans la perception de l'espace et du corps propre. Enfin, nous avons évoqué le problème de la latéralisation des fonctions cérébrales dans le traitement des espaces. Il a été proposé que le cortex cérébral gauche est impliqué dans le codage catégoriel, les détails, les aspects séquentiels, alors que le cortex droit serait impliqué dans le codage métrique de l'espace. Cette différence pourrait être due à des différences de la taille des « champs récepteurs » des deux cortex. Nous avons au laboratoire, en coopération avec des neurologues, étudié la possibilité qu'il y ait aussi une latéralisation des fonctions de l'hippocampe dans le traitement de l'espace. Nous avons montré des résultats qui suggèrent que, au cours de l'évolution une spécialisation est apparue entre l'hippocampe gauche (qui serait impliqué dans l'aspect égocentré, séquentiel de la mémoire épisodique des trajets) et droit (qui serait impliqué dans la mémoire allocentrée).

Le quatrième cours a concerné les stratégies cognitives pour la navigation et en particulier le problème des différences entre les sexes. Nous avons distingué les stratégies égocentrées « topokinesthésiques » terme que j'ai forgé pour tenir compte du fait que cette stratégie implique la mémoire des mouvements associés à des vues et des épisodes, et la mémoire allocentrée « topographique ». Les processus égocentrique et allocentrique se combinent et incluent classiquement a) des représentations spécifiques à des points de vue b) une réactualisation égocentrique/intégration des trajets, c) un module géométrique pour la réorientation. En fait, le cerveau dispose de représentations égo- et allo- *en parallèle*. Les représentations allo- se renforcent avec l'expérience, le nombre d'objets utilisés comme repères, la structure intrinsèque de l'environnement. Nous avons décrit les principaux résultats de notre laboratoire et d'autres équipes sur les bases neurales de ces stratégies et plus particulièrement le rôle de structures comme l'hippocampe, le parahippocampe et le cortex rétrosplénial dans les différentes composantes de ces processus. Nous avons consacré ensuite une partie importante du cours à la question des différences entre les sexes. En effet, ce sujet controversé donne maintenant lieu à de nombreuses découvertes qui en montrent l'importance.

D'abord, il est connu que l'impact des maladies psychiatriques comme la dépression, l'anxiété spatiale, l'agoraphobie, l'autisme est très différent entre les

hommes et les femmes. Il en est de même pour le mal des transports. Ces différences sont liées à des différences de performance mais aussi de processus mentaux dans de nombreuses tâches cognitives qui impliquent l'espace. Par exemple, les hommes sont meilleurs que les femmes dans les tâches de rotation mentale ; ils sont plus performants dans des tâches de rotation mentale pour trouver une plateforme cachée dans le labyrinthe de Morris virtuel. Les hommes ont une meilleure mémoire des cartes. Les garçons sont plus performants pour un transfert du virtuel au réel dans le labyrinthe locomoteur de Kiel. Mais les femmes sont meilleures pour identifier les objets qui ont bougé (le jeu des sept erreurs). Les femmes ont une plus grande rapidité dans des tâches perceptuelles de discrimination ou de comparaison d'items et pour toute tâche qui peut être faite avec une médiation verbale. Elles sont aussi meilleures pour mémoriser des formes significatives et qui peuvent être nommées. Les femmes sont plus influencées par le champ visuel pour la détection de la verticale ou de l'horizontale subjective. Ces différences ont certainement, entre autres facteurs, une base hormonale. En effet le cycle menstruel influence la performance lors de la navigation chez le rat. Les différences sont en partie dues aux facteurs hormonaux. La puberté est un moment important pour séparer les habiletés spatiales des sexes mais des différences apparaissent même avant la puberté, très tôt dans l'enfance. L'influence de l'éducation est certaine mais n'est pas un facteur fondamental. La présence de différences parallèles dans des espèces non humaines met en doute un rôle majeur de l'éducation sauf à montrer que chez les animaux aussi il y a une grande différence d'éducation ce qui n'a pas été fait. Les variations en fonction du cycle menstruel chez les femmes et de la saison chez de jeunes hommes ont été montrées. Les hommes avec des taux de testostérone bas ont une meilleure performance que ceux avec des taux élevés. Une asymétrie du cortex pariétal pourrait être à l'origine des différences entre sexes. Les deux hémisphères sont asymétriques : ces asymétries pourraient être régulées par les androgènes qui induiraient une augmentation de la taille du cortex droit chez les hommes. Mais cette question est encore question très débattue. Toutefois, les cerveaux des hommes et des femmes n'ont pas la même taille. Ces données montrent l'intérêt d'une nouvelle neurosciences cognitive différentielle qui, à son tour pourrait renouveler de façon profonde à la fois la psychiatrie, orienter vers de nouvelles méthodes de rééducation cognitive et aussi suggérer de nouvelles méthodes dans le domaine de l'éducation qui tiennent compte des variétés remarquables du fonctionnement du cerveau humain.

Le cinquième cours a été consacré à *l'espace du geste et de la marche : pour une théorie de la « simplicité »*. En effet, un des problèmes majeurs qui a dû être résolu au cours de l'évolution est celui de la complexité du fonctionnement des multiples réseaux qui permettent de coordonner perception et action et de contrôler la multiplicité des organes effecteurs du corps, les nombreux capteurs sensoriels en tenant compte de la non-linéarité des processus, de l'incertitude, etc. Nous avons évoqué seulement quelques-unes des solutions qui ont été mises

en œuvre par les organismes vivants pour simplifier la « neurocomputation ». J'ai inventé, et utilisé pour la première fois dans ce cours, le terme « simplicité » (qui est déposé auprès des Éditions O. Jacob en vue d'un livre qui portera ce titre) pour signifier que ces solutions ne sont pas nécessairement « simples » mais ont l'élégance, même si elles sont parfois très sophistiquées, de réduire la complexité. Voici quelques exemples qui ont été illustrés de résultats scientifiques précis pour une part déjà décrits dans les livres « Le sens du mouvement » et « la décision ». D'abord le cerveau ne se contente pas de RECEVOIR des informations, il projette sur le monde ses interprétations et ses hypothèses. Il perçoit des formes qui n'existent pas. Il modifie les relations spatiales. Il impose au monde perçu la symétrie. Il prédit et anticipe. Un autre exemple de simplification concerne une activité motrice complexe : la génération des trajectoires locomotrices. La locomotion humaine est en effet un système complexe hiérarchique qui comprend des générateurs de rythme (spinaux), des centres de déclenchement de la marche dans la formation réticulée mésencéphalique, des mécanismes d'orientation (colliculus supérieur) et des effecteurs de patterns locomoteurs (ganglions de la base). Elle exige une coordination entre posture et mouvement, l'utilisation de modèles internes, une adaptation rapide à des contraintes de l'environnement, un guidage et enfin un contrôle cognitif et une intégration multisensorielle associée à une mémoire des trajets à laquelle participent de nombreuses aires cérébrales comme l'hippocampe, etc.

Des principes simplificateurs ont réduit la complexité du contrôle : par exemple l'usage de référentiels mobiles (Cartan), l'anticipation de la trajectoire, des lois de mouvement qui lient cinématique et dynamique comme pour le mouvement du bras (loi du point d'équilibre, contrôle du point final, loi de covariation planaire, loi de la puissance $1/3$ démontrée à l'origine pour les mouvements du bras mais qui est aussi valable pour les trajectoires locomotrices bien que le coefficient varie avec la géométrie de la trajectoire, lois du minimum de secousse, lois du minimum de variance), variables composites, contrôle séparé de la distance et de la direction, ségrégation de variables (rotations, translation, etc.), géométries non euclidiennes. Une simplification remarquable a été réalisée par la stabilisation de la tête pendant les mouvements locomoteurs et même les mouvements les plus complexes. Ceci est accompagné d'une anticipation de la trajectoire par le regard. Cette anticipation existe dans le noir et apparaît au cours de l'ontogénèse. Des expériences ont aussi suggéré une dissociation entre codage de la distance et de la direction. L'orientation, la distance, le mouvement, la direction, la place, etc. sont-ils contrôlés par des réseaux neuronaux différents... ? On connaît actuellement, en effet, des systèmes neuronaux qui codent sélectivement diverses variables pertinentes pour l'orientation spatiale et le mouvement ou les déplacements : 1- Codage des rotations et des translations, 2- Codage des directions : neurones de direction de la tête, 3- Codage du point de vue, 4- Codage de place (neurones de grille, neurones de lieu, neurones de proximité (barrière), neurones de but. Enfin, nous avons exposé une propriété

particulièrement remarquable d'un codage de l'espace par le temps. Ce processus a été nommé « précession » par les neurophysiologistes qui l'ont découvert.

Plusieurs modèles de ce processus ont été proposés : Modèle I. Oscillateurs découplés. La précession de phase émerge des interactions entre deux oscillateurs découplés. Modèle II. Niveau d'excitation. La précession de phase émerge des interactions entre excitation croissante et inhibition rythmique. Modèle III. Propriétés de réseau. La précession de phase émerge des propriétés de réseau résultant de connexions synaptiques asymétriques.

Le sixième cours a été consacré aux fondements transculturels de la pensée rationnelle et à la manipulation mentale des référentiels spatiaux. J'ai tout d'abord rappelé les thèses du cours : les bases neurales de la manipulation mentale des référentiels spatiaux (égocentrés, allocentrés, géocentrés, hétéro-centrés, espace proche et lointain, etc.) sont un des fondements de la pensée rationnelle et en particulier de notre capacité de faire de la géométrie, du raisonnement, des changements de point de vue, du traitement simultané des différents « points de vue », des branchements logiques, mais aussi de l'interaction avec autrui, de l'intersubjectivité, de l'empathie. Elles exigent la constitution du corps propre, la mise en cohérence de la multiplicité des codages sensoriels et des modèles internes, etc.

La question est donc : peut-on trouver dans les manifestations diverses de la culture une expression de cette combinatoire de référentiels spatiaux entre le corps propre, l'espace de l'action, l'espace lointain, etc. ? Un très bel exemple est fourni par l'architecture de la maison commune chez les Mirana en Amazonie étudiée par Karadimas. L'architecture de la *maloca* miraña comprend une entrée principale : « ouverture » (*i:ogwa*) (métaphore du sexe féminin), une faîtière, ou « colonne vertébrale » (*baχui*), et des chevrons : « côtes » (*miχkogwa*). La section longitudinale de la *maloca* correspond au squelette d'une femme couchée faisant face au ciel, et celle du toit correspond à celui d'un homme faisant face au sol vers le sol. Ces deux corps sont dans la posture sexualisée de l'accouplement. Le ciel est masculinisé et la terre est féminisée. Mais ces deux corps sont orientés par rapport aux points cardinaux géographiques ou plutôt par rapport à la terre telle qu'elle est perçue par les Mirana à savoir un disque plat orienté ouest — est (par l'amont et l'aval de grands fleuves). Il y a donc imbrication du monde et de la *maloca* comme système de représentation et de compréhension mutuelle des deux univers. Transformation de la temporalité quotidienne en temporalité mythique lors des rituels. Le déplacement des danseurs masqués à l'intérieur de la *maloca* est un déplacement dans l'espace (fleuve, amont/aval, source/embouchure, etc.), en même temps que l'édifice devient un modèle du monde grâce à une recombinaison imagée des l'ensemble des représentations (espace/maison/corps). Un deuxième exemple a été emprunté à une étude de Levinson qui a réalisé une étude comparée du raisonnement spatial dans deux cultures différentes : les habitants d'un village hollandais et d'un village en Namibie. En effet dans le langage trois cadres de référence principaux sont utilisés : 1- Relatif, dépendant du point de vue (égocentré) : « En face, à gauche, etc. (de mon point

de vue) » 2- Intrinsèque (référé à un objet) : « la balle est à gauche de l'arbre »
3- Absolu (allocentré) utilisant des repères cardinaux (nord, sud, etc.). Les constructions relatives sont dominantes dans les langages européens. La construction absolue est dominante dans des langages indigènes (Australie, Papouasie, Nouvelle Guinée, Mexique, Népal, etc.). L'expérimentation a porté sur la reconnaissance de la place d'objets après des changements de point de vue. Le sujet est en face d'une table sur laquelle sont disposées 5 coupes renversées. On cache un objet sous l'une d'entre elles. Puis le sujet change de place et se trouve devant une table symétrique de la première cachée par un écran. Sur cette table 5 coupes identiques à celles de l'autre table. On pose au sujet la question : où est l'objet ? Trois stratégies possibles et donc trois réponses sont possibles. L'intérêt de cette étude a été d'être aussi complétée par un travail sur plusieurs espèces de primates non humains. Elle montre un parallèle entre les référentiels utilisés dans le langage et dans une tâche spatiale et bouleverse en partie l'idée que l'homme utilise principalement un codage égocentré et suggère que le codage allocentré de l'espace est fondamental. Les préférences cognitives dans le choix des référentiels chez l'humain varient en relation avec les préférences du langage naturel. Cette corrélation est robuste à partir de 8 ans et persiste chez l'adulte. Chez les grands singes testés en général on observe une préférence pour le codage « environnemental » (allo) plutôt que ego. Les résultats montrent que ce BIAIS cognitif vers une stratégie peut être dépassé par des facteurs culturels. La théorie de Levinson suppose que l'acquisition d'une stratégie égocentrique se fait avec un « coût ». Il se base sur le fait que les enfants qui acquièrent la stratégie allo le font dès 4 ans et la stabilisent à 7-8 ans alors que la stratégie ego serait acquise plus tard. Une autre étude récente à laquelle a participé notre collègue le Pr Dehaene a été réalisée chez les Munduruki en Amazonie sur la question des « primitives conceptuelles » de la géométrie. Nous avons discuté ces résultats dans le contexte de travaux d'imagerie cérébrale de notre laboratoire sur les bases neurales des stratégies de localisation d'objet dans des référentiels égocentrés ou allocentrés. Mais l'espace est utilisé pour les fonctions cognitives les plus élevées, la mémoire et le raisonnement ou même la création. Yates a montré que l'espace est utilisé dans « l'art de la mémoire » pour engranger et retrouver les objets, les lieux, les événements, les mots, les concepts. Pour Carruthers, l'usage de l'espace permet aussi de trouver des combinaisons nouvelles, d'inventer des histoires, de créer, de faire des associations nouvelles. L'architecture est aussi une façon d'ordonner les concepts, les idées. Un exemple très curieux d'utilisation de l'espace et des trajets pour l'enseignement a été découvert par notre collègue Scheid dans un manuscrit où l'auteur utilise un cheminement dans la ville de Rome pour l'éducation des élites aux convenances de la vie sociale romaine. Enfin l'espace est utilisé par les écrivains comme support à la description par le langage des situations sociales ou pour la construction même de leurs romans, comme le montre un ouvrage, « L'invention des lieux ». La carte est par exemple au service du souvenir dans les dessins du livre « La vie de Henri Brulard » de Stendhal.

L'utilisation de l'espace par Zola pour l'écriture des « Rougon-Macquart » est aussi un exemple intéressant. L'espace déformé est guide de la pensée créatrice qui construit le roman. On peut observer cette déformation, cette évolution du dessin dans la rédaction par Zola du banquet des Rougon-Macquart : le croquis conserve d'abord la place des invités et renoue avec « l'art de la mémoire ». Le plan de table respecte les usages. Mais Zola modifie ensuite le plan car le monde afflue sans invitation ; de 28 on passe à 38 convives. L'espace s'érotise, la table devient l'arme fatale des aguicheuses. La maîtrise graphique finit par servir la poétique d'une libido collective démesurée. Dans ce premier grand dîner des Rougon-Macquart, Saccard réunit les acteurs de son plan diabolique : construire une fortune immédiate grâce à des spéculations véreuses. Il s'agit ici de la pensée « catégorielle » de Zola qui complète l'esprit de géométrie (« métrique »). Un autre dessin concerne une « famille à la croisée des chemins » : Gervaise et ses enfants empruntent ces rues qui rayonnent et les mènent vers leur Destinée. L'espace et le dessin sont aussi utiles à l'écrivain pour réaliser la synthèse des points de vue. Flaubert utilise le dessin pour construire peu à peu une description avec le langage de la disposition de la forteresse de Machaerous dans « Hérodiad » ; « *La forteresse de Machaerous se dressait à l'orient de la mer morte, sur un pic de Basalte, ayant la forme d'un cône. Quatre vallées profondes l'entouraient, deux vers les flancs, une en face, la quatrième au-delà. Des maisons se tassaient contre sa base, dans le cercle d'un mur qui ondulait suivant les inégalités du terrain* ». Un premier dessin montre la vue de dessus de la citadelle : c'est la « mise en mémoire des éléments du site ». D'autres dessins mettent la forteresse en contexte dans son environnement. Nous avons aussi mentionné l'usage de l'espace par Proust qui a été largement décrit dans le cours de notre collègue le Pr Compagnon dans son cours de 2007. Enfin nous avons donnée des exemples de labyrinthes. L'image et la réalisation de labyrinthes sont tellement universelles que l'on peut suggérer qu'il y a là un outil fondamental de la pensée. De même, l'architecture et l'organisation spatiale des jardins sont un témoin des modes de pensées dominants. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les jardins anglais et français. Pour clore ce cours sur le cerveau et ses espaces nous avons montré la remarquable variété des espaces de la mise en scène théâtrale, illustration de la capacité du cerveau humain de manipuler des espaces mais aussi de le faire percevoir à autrui et d'utiliser l'espace pour transmettre les émotions et les sentiments qui accompagnent l'expérience sensible du vécu, de ses joies et de ses tragédies.

SÉMINAIRES DU COURS DU PROFESSEUR ALAIN BERTHOZ EN 2007

— 10 janvier : Dr A. TRILLER (INSERM et Département de Biologie de l'École Normale Supérieure, Paris), « Permanence de la forme et instabilité moléculaire dans la communication neuronale ».

— 17 janvier : Pr D. BENNEQUIN (Université Paris VII), « Les repères des neurones : mouvement, cartes ou grilles ? »

— 24 janvier : Pr R. JOUVENT (Service de Psychiatrie. Hôpital de la Salpêtrière), « Le plaisir et l'angoisse de l'espace. Remédiation des pathologies psychiatriques par les méthodes de réalité virtuelles ».

— 31 janvier : Dr E. MAGUIRE (Institute of Neurology University College London), « La navigation, la mémoire et le cerveau humain ».

— 7 février : Pr R. LINAS (Université de New York), « Espaces dynamiques et fonctions du cerveau ».

— 14 février : Pr J. HUBEN (École de théâtre Jacques Lecoq, Paris), « Le corps et l'espace au théâtre ».

TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

1. PERCEPTION ET EXPLORATION ACTIVE DES OBJETS

1.1. PERCEPTION VISUELLE DES OBJETS ET DU MOUVEMENT

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

Notre équipe étudie 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 motrice : mouvement du regard, déplacement de la tête, mouvement de la main. Ces recherches sont organisées autour de 4 thèses, dont deux ont été soutenues cette année. La thèse de Matthieu Vallet (codirigée avec A. Kemeny, contrat Cifre Renault) était centrée sur la contribution des textures dynamiques et de l'éclairage sur la perception des objets en environnement virtuel. Camille Morvan (codirection Mark Wexler) a étudié la perception du mouvement pendant la poursuite oculaire et l'intégration des signaux rétinien et de la copie efférente de la commande oculaire. Elle s'est notamment intéressée au cadre de référence, rétinien ou allocentrique, dans lequel s'effectue la recherche visuelle d'éléments en mouvement. Elle a également étudié l'influence de la vitesse oculaire pendant la poursuite sur la perception de la direction du mouvement d'une cible visuelle. La thèse de Céline Devisme (contrat Cifre avec Essilor) est centrée sur l'étude des gradients de disparité binoculaires horizontaux et verticaux et leur influence sur la perception du relief en vision périphérique. Ces études permettent de quantifier l'incidence des distorsions induites par le port de verres ophtalmiques. Enfin, la thèse de Christian Boucheny (codirigée avec Georges-Pierre Bonneau, contrat Cifre EDF) a pour objectif l'étude psychophysique des méthodes de visualisation scientifique, notamment les techniques de rendu volumique et de restitution cinématique. Il a également mis en place de nouvelles méthodes de visualisation interactive, couplant un oculomètre de précision à des algorithmes de simplification dans le cadre de la visualisation de grandes bases de données tridimensionnelles.

1.2. MODÉLISATION BAYÉSIENNE DES COMPORTEMENTS SENSORI-MOTEURS J. DROULEZ, F. COLAS, S. CAPERN, J. LAURENS, A. HOULLON

Dans le cadre du programme européen BACS dont l'objectif est de démontrer l'intérêt de l'approche bayésienne en robotique et pour les sciences cognitives, 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. Nous avons développé un modèle bayésien dynamique de la perception du mouvement propre à partir des informations vestibulaires (thèse de Jean Laurens). Dans ce modèle, les caractéristiques dynamiques de la perception du mouvement et les ambiguïtés qui résultent de l'équivalence gravité-inertie sont expliquées par les connaissances *a priori* quantifiées de façon probabiliste. Nous avons également développé un modèle unifié de la perception des objets tridimensionnels à partir des informations visuels (flux optique) et de la connaissance du mouvement propre (signaux vestibulaires et moteurs). Ce modèle permet d'intégrer de façon cohérente les hypothèses de rigidité et de stationnarité et reproduit un grand nombre de résultats psychophysiques (thèse de Francis Colas, codirigée par Pierre Bessière). Enfin, la thèse de Simon Capern est centrée sur la modélisation de la perception du mouvement et des réseaux neuronaux codant les fréquences spatio-temporelles des stimuli visuels. Une revue des modèles de détection du mouvement a été réalisée, ainsi qu'un modèle (en collaboration avec Daniel Bennequin) de la distribution des réponses aux fréquences spatio-temporelles dans VI qui rend compte des résultats décrits en imagerie optique.

1.3. APPROCHE PROBABILISTE DE LA FUSION D'INFORMATION ET DE L'ANALYSE DE SIGNAUX BIOLOGIQUES

J. DROULEZ, L. FOUBERT, collaboration avec T. CHAPERON & D. BENNEQUIN
(Institut de Mathématiques)

De nouveaux outils probabilistes ont été développés pour la calibration et à l'estimation de la pose de caméra ainsi qu'à l'extraction de données 3D à partir de séquences vidéo dans différentes conditions d'éclairage dans le cadre d'une collaboration avec EDF. Ces algorithmes sont utilisés dans l'interprétation et la numérisation 3D de bâtiments ou de sites préhistoriques (Lascaux) et archéologiques (Delphes). La modélisation par mixture de gaussiennes de la distribution des boutons synaptiques fournit une représentation quantitative dense des données neuro-anatomiques et un outil précis de détermination des clusters (thèse de Luc Foubert, codirigée par Chantal Milleret). Enfin, l'analyse statistique fine du bruit des données d'imagerie optique corticale a permis de proposer de nouvelles méthodes de traitement applicables aux enregistrements en fluorescence voltage-dépendante.

2. INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE ET PERCEPTIF SENSORIELLE

C. MILLERET, L. FOUBERT, en collaboration avec S. TANAKA (Riken BSI, Tokyo, Japon), J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

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

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

La technique d'imagerie optique permet de mettre en image l'architecture fonctionnelle du cortex tant les domaines spatiaux que temporels. Son principe de fonctionnement en est le suivant : une caméra CCD à haute fréquence de rafraîchissement (500Hz) est placée au-dessus de la préparation et enregistre les variations de réflexion d'une lumière incidente qui varient avec l'activité corticale. En utilisant des colorants fluorescents voltage-sensibles, apposés à même le cortex, nous venons de réussir à obtenir des cartes corticales avec une résolution spatiale de 50 μm et une résolution temporelle de 3 ms sur de grandes étendues de cortex, simultanément au niveau des 2 hémisphères. Un tel résultat correspond à une réelle prouesse technique. Aussi sommes-nous maintenant en mesure d'aborder l'étude des caractéristiques spatio-temporelles de l'intégration inter hémisphérique visuelle au niveau du cortex visuel avec des conditions expérimentales optimales.

2.2. UNE ANALYSE QUANTITATIVE DE LA DISPERSION TRIDIMENSIONNELLE DES SYNAPSES

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

Dans le cadre de cette étude, une nouvelle méthode statistique permettant de caractériser l'organisation « en amas » de la connectivité corticale a été développée. Au-delà d'une telle caractérisation, cette méthode avait aussi pour buts : a) de comparer différentes populations neuronales sur la base de l'organisation spatiale de leur connectivité respective ; b) d'établir une relation entre la dispersion spatiale des boutons synaptiques et les cartes corticales fonctionnelles elles-mêmes ; c) de définir des « quantités » nouvelles pour comparer des groupes de boutons synaptiques de divers neurones.

Cette nouvelle méthode conjugue algorithmes de fusion et optimisation bayésienne. La distribution spatiale des boutons est modélisée par une mixture de Gaussienne. Un prior est appliqué sur le nombre de gaussiennes et le principe du maximum *a posteriori* a été utilisé pour estimer le nombre et le poids des amas de boutons au niveau de branches axones individuelles. Elle a permis aussi de définir le centre de ces amas et leurs matrices de covariance. Cette méthode

a été d'abord validée à partir de données synthétiques. Des arborisations terminales de neurones calleux dont l'axone interconnecte les deux hémisphères via le corps calleux ont ensuite été utilisées. Ces dernières ont été marquées de façon antérograde avec de la biocytine puis reconstruites en 3D à partir de sections sériées des aires visuelles corticales 17 et 18 du chat. La plupart de ces terminaisons (N=13) ont été reconstruites chez des animaux adultes normaux et avaient été déjà décrites qualitativement (Houzel *et al.*, 1994). Une terminaison axonale anormale identifiée chez un chat adulte dont l'expérience visuelle a été monoculaire depuis la naissance a de plus été présentée pour tester notre méthode sur une terminaison complexe et anormalement étendue (Milleret *et al.*, en préparation). Dans le cadre de la présente étude, ces mêmes neurones calleux ont été décrits quantitativement par les coordonnées 3D de leurs branches terminales respectives. Comme nous l'espérons, cette nouvelle méthode d'analyse est simple et efficace. Elle permet une description *quantitative* fine d'amas de branches neuronales terminales. Au-delà, elle permet efficacement de caractériser une certaine population de neurones, de comparer plusieurs populations de neurones et même d'établir une corrélation entre l'anatomie et la fonction cérébrale.

3. MÉMOIRE SPATIALE ET NAVIGATION

3.1. CORRÉLATIONS SPATIALES ET À LA RÉCOMPENSE DANS LE CORTEX PRÉFRONTAL MÉDIAN DE RATS APPRENANT DIFFÉRENTES CONTINGENCES SUR UN LABYRINTHE EN Y
S.I. WIENER, M. KHAMASSI, A. PEYRACHE, V. DOUCHAMPS (LPPA), en collaboration avec P. TIERNEY, F. BATTAGLIA (Université de Rotterdam)

Afin de mettre en évidence, dans le cortex préfrontal, les mécanismes impliqués dans la prise de décision, des neurones des aires prélimbique et infralimbique (PL/LI) ont été enregistrés simultanément, grâce à un ensemble de tétrodes, chez le rat libre de ses mouvements effectuant une tâche de changement de contingence entre modalités spatiales et taxones. Sur un labyrinthe en Y, 5 rats, sous légère privation de nourriture, devaient apprendre seulement sur la base de la présence ou absence de récompense la contingence actuelle parmi quatre possibilités : aller au bras droit, au bras éclairé, au bras gauche et enfin au bras sombre. Dès que le rat apprenait, la contingence était changée. Sur les 2 456 cellules analysées pendant 108 sessions, 331 étaient sélectives à l'absence ou présence de récompense sur le bras choisi ($p < .01$, Kruskal-Wallis). Parmi ces sélectivités, 223 étaient restreintes à la période suivant la récompense, 90 à la période précédant la récompense, et 18 cellules avaient une sélectivité pour ces deux périodes. D'autre part, 316 neurones montraient une sélectivité spatiale (en fonction du bras visité). Cette modulation pouvait avoir lieu autant avant la récompense ($n=151$) qu'après ($n=120$), et parfois même sur les deux périodes ($n=45$). Cependant, si l'on compare cette sélectivité au bras visité entre la période avant ou après la choix de bras : 36 cellules avaient cette sélectivité avant, contre 271 après, et 9 cellules dans les deux périodes. Ceci suggère que l'activité préfrontal

correspond à la comparaison entre la prédiction et l'obtention (ou l'absence) de récompense. En revanche la représentation du choix du choix est faiblement encodée. Toutefois la diversité des réponses fournit, à l'échelle de la population, l'information nécessaire pour élucider les contingences de la tâche, et pour produire une réponse comportementale appropriée aux changements inter-modalités.

3.2. MODÉLISATION ACTEUR-CRITIQUE DES RÉPONSES ANTICIPATRICES DANS LE STRIATUM VENTRAL CHEZ LE RAT PENDANT UNE SÉQUENCE DE RÉCOMPENSES

M. KHAMASSI, A.B. MULDER, E. TABUCHI, V. DOUCHAMPS, S.I. WIENER

De nombreuses études neurobiologiques indiquent que le système striatal fonctionne selon les prédictions des modèles théoriques Acteur-Critique d'apprentissage par essai-erreur. Des enregistrements chez les primates sont consistants avec l'hypothèse que le striatum ventral (VS) pourrait jouer le rôle d'un Critique, apprenant à anticiper les récompenses futures, par une interaction avec le système dopaminergique (sDA ; décrite par l'algorithme d'apprentissage par Différence Temporelle. Afin de déterminer si l'activité du VS du rat est compatible avec un rôle homologue, nous avons enregistré des neurones des zones du VS projetant préférentiellement vers sDA, pendant que des rats légèrement apprivoisés apprenaient à retrouver des récompenses de différents volumes d'eau aux différents bras d'un labyrinthe en forme de croix. L'eau n'était délivrée par gouttes séparées par intervalles d'une seconde, permettant de dissocier les composantes comportementales et anticipatrices des réponses neurales. Parmi les réponses observées, nous trouvons bien des activités prédites par la théorie : un ensemble de cellules anticipent chaque goutte d'eau. Certaines cellules prolongeaient leur activité comme si elles anticipaient une goutte d'eau supplémentaire. Nous montrons enfin que ces activités peuvent être reproduites en modélisant un Acteur-Critique à multi-modules, et qu'il suffit de jouer sur les informations en entrée du modèle pour obtenir l'anticipation d'une goutte supplémentaire. Cette approche corrobore un modèle récent dont la variation des informations d'entrée de deux modules Acteur-Critique sert à simuler différentes stratégies de navigation spatiale chez le rat.

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

Dr L. RONDI-REIG, E. BURGUiÈRE, G. PETIT, C. FOUQUET, K. IGLÒI, Dr A. ARABO, Dr E. GAILLARD (FRM). Collaborations internationales : Center for learning and Memory (Pr TONEGAWA), Université de Rotterdam (Pr DE ZEEUW), University College of London (Pr BURGESS)

Notre projet de recherche est centré sur l'analyse des bases neurales de l'orientation spatiale et de ses dysfonctionnements au cours du vieillissement. Ce projet s'appuie sur une double approche comportementale et génétique, avec d'une part le développement de tests de comportement permettant de disséquer finement différentes stratégies de navigation (en particulier le test du starmaze) et d'autre

part l'utilisation de souris transgéniques conditionnelles (i.e. dont le gène cible est inactivé ou sur-exprimé dans une région très précise du cerveau). Plus récemment, notre projet chez l'animal a été étendu à l'homme grâce à une collaboration avec le Pr Alain Berthoz et Mohamed Zaoui. Nous avons ainsi adapté, grâce à l'utilisation de la réalité virtuelle, un des protocoles expérimentaux de navigation que nous utilisons chez l'animal aux sujets humains.

1. Le premier volet de ce projet soutenu par l'ACI de Neurosciences intégratives, concerne le rôle joué par un mécanisme de plasticité synaptique, se produisant au niveau du cortex cérébelleux, dans les capacités d'orientation spatiale. Il est réalisé en collaboration avec le Pr CI De Zeeuw, le Dr Arabo et Éric Burguière. Nous avons récemment corrélé l'absence d'un mécanisme de plasticité synaptique (LTD) au niveau des synapses entre les fibres parallèles et les cellules de Purkinje avec un déficit d'orientation spatiale. Nous proposons que ce mécanisme soit nécessaire pour la mise en place d'une fonction d'adaptation sensorimotrice qui servirait aussi bien dans des fonctions motrices que dans des fonctions plus cognitives comme la navigation.

2. Le deuxième volet du projet concerne les dysfonctionnements de l'orientation spatiale liés au vieillissement. Ce projet fait l'objet des projets de thèse de Géraldine Petit et de Céline Fouquet et du projet post-doctoral du Dr Émilie Gaillard. Notre but est de comprendre l'origine des troubles cognitifs liés à l'âge en les dépistant le plus précocement possible. Notre hypothèse est que ces déficits ne seraient pas causés par la perte de fonction totale au niveau d'une structure mais plutôt par la réorganisation des réseaux neuronaux aboutissant à la modification de la fonction. Nous pensons que cette réorganisation se traduit par des changements de comportement, notamment des changements de stratégies de navigation. Nous avons récemment démontré que les stratégies de navigation les plus complexes, dépendantes de l'hippocampe sont les premières altérées au cours du vieillissement.

3. Le travail impliquant des sujets humains pose la question de l'organisation et du choix des stratégies de navigation en fonction de paramètres comme la complexité de l'environnement ou encore l'âge de l'individu. Un des buts de ce projet est également de comparer les propriétés de navigation entre homme et animal afin de mettre en évidence des propriétés de fonctionnement communes aux différentes espèces. Il fait l'objet du projet de thèse de Kinga Igloi et d'une collaboration avec le Pr Berthoz et Mohamed Zaoui dans le cadre d'un projet européen WAYFINDING. Nous avons adapté le test du « Starmaze » en réalité virtuelle pour étudier les stratégies de navigation spontanément utilisées chez l'Homme. Nos résultats montrent que l'Homme utilise des stratégies de navigation qui sont celles également développées chez nos modèles animaux. Ces différentes stratégies permettent un apprentissage de la tâche semblable et sont encodées en parallèle. Ces résultats confortent l'idée d'une coexistence mentale de différentes stratégies de navigation sous-tendues par différents systèmes de mémoire aussi bien chez l'animal que chez l'homme. Afin de caractériser les

différents systèmes sous-tendant ces stratégies de navigation, une étude en IRM fonctionnelle réalisée pendant que les sujets humains réalisent la tâche du star-maze est actuellement en cours, en collaboration avec le Pr Neil Burgess.

4. MÉMOIRE SPATIALE ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT

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

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

La génération de saccades oculaires implique l'activation de nombreux circuits neuronaux sous-corticaux (formation réticulée, colliculus supérieur, cervelet, ganglions de la base) et corticaux (champs oculaires frontaux, cortex intra pariétal latéral, etc.). La richesse de données anatomiques, électrophysiologies et comportementales accumulées permet d'envisager la modélisation de l'ensemble de ces circuits et de leurs interactions. La mise en oeuvre d'un tel modèle a pour double objectif d'améliorer notre compréhension du fonctionnement du système saccadique dans son ensemble et de disposer d'un banc d'essai pour l'étude de la dynamique des multiples boucles interconnectées caractéristiques du système nerveux central. Ce dernier aspect, se fonde sur la théorie de la contraction pour les systèmes non linéaires (Lohmiller et Slotine, 1998). Une preuve mathématique reliant la génération de la commande saccadique à la géométrie des cartes colliculaires, ainsi que le modèle computationnel correspondant ont été proposés (Tabareau *et al.*, sous presse). Un modèle contractant des boucles cortico-basothalamo-corticales a été conçu (Girard *et al.*, 2005, 2006), et testé dans une tâche de survie pour robot autonome (Girard *et al.*, soumis).

4.2. MODÈLE BAYÉSIEN DE LA SÉLECTION DE SACCADÉS

F. COLAS, B. GIRARD, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec P. BESSIÈRE (INRIA, Grenoble), L. CANTO PEREIRA, T. TANNER et C. CURIO (MPI, Tübingen) dans le cadre du projet européen BACS.

Afin d'étudier le rôle éventuel d'un encodage prenant en compte explicitement l'incertitude dans les processus de sélection de l'action, un modèle de sélection de cibles pour les mouvements des yeux formalisé dans le cadre de la programmation bayésienne a été développé. Il est fondé sur des cartes d'occupation reprenant la géométrie particulière du colliculus supérieur. Parallèlement, des mesures de mouvements des yeux dans une tâche de sélection ont été menées et l'adéquation du modèle vis à vis des données expérimentales est en cours d'étude.

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

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

Les différentes modalités sensorielles ont longtemps été considérées comme des modules indépendants communiquant avec un nombre restreint d'aires associatives multimodales. Cependant, de nombreux travaux montrent que notre perception du monde est intrinsèquement multi-sensorielle. Ce projet porte sur la contribution de la modalité acoustique aux mécanismes d'orientation spatiale. Une approche expérimentale basée sur l'emploi de la réalité virtuelle multi-sensorielle (vision, audition, vestibule) est employée. La stimulation auditive est spatialisée grâce à une technique binaurale, permettant de simuler un environnement tridimensionnel externalisé interactif, spécifiquement adapté à « l'écoute » de chaque individu (approche temps réel avec HRTF individuelles). L'objectif est de comprendre comment sont combinées les informations provenant des différents sens en un percept du monde unifié et pertinent pour l'action. Un déficit de ce processus cognitif pourrait expliquer les hallucinations corporelles et spatiales à l'œuvre dans certaines pathologies. Ainsi une bonne compréhension de ce mécanisme pourrait fournir des thérapies cognitives nouvelles.

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

M. LAFON, J. WIENER, A. BERTHOZ (LPPA), G. THIBAUT (EDF)

Cette recherche s'insère pour moitié au sein d'un projet de recherche d'EDF qui vise à définir un outil d'aide à la navigation en centrale et pour moitié au sein de l'équipe « contrôle du mouvement et navigation » du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action au Collège de France. De nombreuses collaborations internationales sont menées par le biais de projets européens BACS et WAYFINDING notamment.

Lors d'une première expérience, nous avons pu tester l'effet d'un amorçage de type carte sur un apprentissage kinesthésique d'un trajet. Nous avons demandé au sujet de réaliser plusieurs tâches d'orientation et de navigation pour nous rendre compte de l'interaction possible entre les représentations mais aussi entre les stratégies. Nous concluons que l'effet de l'amorçage sur un apprentissage kinesthésique d'un trajet est très différent suivant le type de tâche demandé. Une deuxième expérience nous a permis de montrer que la planification dans l'incertitude d'un trajet connu était réalisée de manière extrêmement performante par les sujets, et nous avons étudié le rôle des kinesthèses lors de cette planification de trajet.

4.5. RÔLE DU SYSTÈME KINESTHÉSIQUE DANS LA CONSTITUTION DU MONDE VÉCU : PROBLÈMES THÉORIQUES

J.L. PETIT (Enseignant-chercheur associé au LPPA, Pr à l'Université Marc Bloch, Strasbourg II)

L'ouvrage paru à l'automne 2006, *Physiologie de l'action et phénoménologie* par A. Berthoz et J.L. Petit, a mis en place le cadre d'une interprétation systématique de la nouvelle posture théorique propre à la physiologie de l'action en remplaçant celle-ci dans la perspective du dernier Husserl. La dernière partie de l'œuvre de ce philosophe nous a, en effet, paru particulièrement éclairante pour notre propos dans la mesure où il ne cherchait plus à fonder le sens propositionnel sur les capacités de saisie théorique et d'expression linguistique du sujet comme dans la première partie de son œuvre. Il fondait plutôt la constitution du sens du monde vécu pour l'agent humain sur les capacités donatrices de sens des systèmes kinesthésiques de son organisme. Ce cadre d'interprétation permettait de souligner efficacement l'originalité d'approche de la perception par la physiologie de l'action en émancipant celle-ci de l'idéologie du système cognitif à base de représentation passive d'une information externe préconstituée et de la transformation computationnelle de cette représentation. Néanmoins, un certain nombre de problèmes théoriques nouveaux étaient posés, problèmes que le seul progrès des recherches empiriques n'est pas de nature à résoudre, mais qu'il importe de résoudre pour déblayer la voie d'un tel progrès. Nous nous sommes donc appliqués à formuler ceux-ci clairement et à les acheminer vers leur possible solution. C'est ce que nous avons fait, d'une part, en répondant à diverses invitations à des conférences dans des congrès internationaux et, d'autre part, en organisant avec une quinzaine de chercheurs ayant lu et apprécié l'ouvrage une table ronde d'une journée au Collège de France dans le prolongement du séminaire du cours sur le cerveau et l'espace de A. Berthoz. Fondamentalement, toutes ces questions tournent autour d'un thème unique : quelle contribution de « simples » mécanismes fonctionnels du système nerveux peuvent-ils apporter au sens des actions, tel que l'agent lui-même ou un autre partenaire peut l'appréhender de façon intuitive ou réflexive, tel éventuellement qu'on pourrait le porter à l'expression verbale dans une langue naturelle ? La question reçoit une formulation plus précise dans le contexte de quelques-unes des théories contemporaines de l'action et de la cognition. La découverte des systèmes résonnants du cerveau va-t-elle relancer le mouvement de naturalisation des sciences sociales en nous donnant la clé de l'empathie, de l'imitation et de la formation des entités collectives ? La théorie des actes de parole de Austin-Searle-Vanderveken qui repose sur l'interprétation de la promesse et autres actes proto-juridiques en termes d'attitudes propositionnelles — donc en termes de logique de la proposition — va-t-elle restituer une dimension posturale à son concept d'attitudes en renouant avec la physiologie de l'action ? etc. À toutes ces questions le style d'abordage usuel en phénoménologie nous permet d'envisager la possibilité d'une réponse cohérente, sinon unique, sur la base des affinités entre la nouvelle conception du

dynamisme fonctionnel du cerveau. Cette réponse consiste avant tout à dégager la notion de sens du préjugé en faveur d'un seuil rigide ou d'une frontière bien délimitée du sens et du non sens, une idée naïve entretenue par une psychologie cognitive imprégnée de philosophie analytique. D'une manière générale, nous avons travaillé à l'élaboration d'une conception de la gradation continue du « faire sens » depuis les valeurs biologiques et évolutionnistes dont s'enrichissent progressivement les patrons d'activation des circuits cérébraux jusqu'aux actes intentionnels délibérément orientés vers un but et accessibles à l'expression explicite dans un médium représentationnel intersubjectif comme le langage naturel.

4.6. ORGANISATION DE L'ACTIVITÉ LOCOMOTRICE CHEZ L'HOMME

4.6.1. COORDINATION INTERSEGMENTAIRE PENDANT LA LOCOMOTION

A. BERTHOZ, H. HICHEUR (LPPA), A.V. TEREKHOV (Moscow State University)

L'émergence progressive d'une marche stabilisée apparaît avec quelques années d'expérience locomotrice. Chez le sujet adulte, la coordination entre les différents segments corporels durant la marche se caractérise par une grande stéréotypie à la fois en termes de déplacement des segments corporels dans l'espace absolu, mais également en termes de déplacements articulaires. Cette observation est particulièrement frappante si l'on considère la grande dimensionnalité du système locomoteur humain (et la grande redondance des solutions motrices permettant de se déplacer). Dans ce projet, nous nous intéressons aux principes simplifiant la génération et la régulation du pattern locomoteur chez l'Homme. Nous avons analysé la modulation des règles de coordination intersegmentaire lors de différentes formes de locomotion (marche vers l'avant, vers l'arrière, course... Hicheur, Terekhov & Berthoz 2006). Nous avons pu identifié, grâce à une double analyse cinématique et électromyographique, la nature des facteurs passifs (mécaniques) et actifs (résultant du contrôle nerveux) contribuant à la formation du pattern locomoteur. En particulier, une réflexion sur l'apprentissage des propriétés physiques de l'interaction entre le corps et l'environnement (gravité...) résultant en une optimisation de l'activité locomotrice a été entreprise.

4.6.2. GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES LOCOMOTRICES CHEZ L'HOMME

A. BERTHOZ, H. HICHEUR, Q.C. PHAM (LPPA), en collaboration avec
G. ARECHAVALETA, J.P. LAUMOND (LAAS-CNRS Toulouse)

La simple tâche de se diriger vers et de franchir une porte, depuis une position et une orientation données, peut s'effectuer via une infinité de trajectoires permettant de réaliser la tâche. Nous avons répété cette simple situation naturelle chez différents sujets qui devaient franchir un total de 40 cibles (une cible étant définie par la position et l'orientation d'un portique dans l'espace de locomotion), et avons observé que les trajectoires locomotrices humaines étaient stéréotypées, à la fois en termes de géométrie du trajet mais également en termes de profils de vitesse et de déplacement angulaire du corps dans l'espace (Hicheur *et al.*, sous

presse). Cette stéréotypie des trajectoires contraste avec une grande variabilité dans le placement des pieds au sol tout au long de la trajectoire, suggérant l'existence de principes communs à l'ensemble des sujets pour, véritablement, planifier la trajectoire dans son ensemble, et non comme une succession de pas. Ces observations justifient le développement d'une approche de modélisation de la planification de trajets basée sur l'aspect non-holonome de la locomotion humaine et sur des algorithmes de commande optimale : cette approche a abouti à de très bonnes prédictions du millier de trajectoires enregistrées (Arechavaleta *et al.* 2006a, 2006b, Pham *et al.*, sous presse). Cette interaction entre des approches provenant de la robotique et celles provenant des neurosciences fait l'objet d'une collaboration dynamique entre les équipes du LPPA et du LAAS.

4.6.3. EXPRESSION CORPORELLE DES ÉMOTIONS PENDANT LA LOCOMOTION HUMAINE

A. BERTHOZ, J. GRÈZES, H. HICHEUR, L. YAHIA-CHÉRIF (LPPA), Projet Human Frontiers

La production du mouvement biologique est caractérisée par un ensemble d'observations particulièrement robuste et reproductible à travers différentes conditions expérimentales (loi de Fitt, loi de Listing, loi de puissance 1/3...). Ainsi la génération de trajectoires locomotrices est régie, comme le sont les mouvements de la main dans des actions de dessin, par une corrélation forte entre les propriétés géométriques de la trajectoire et la cinématique de l'effecteur. Ces particularités du mouvement biologique (ou invariants moteurs) contraignent également la perception du mouvement : le mouvement sera perçu comme fluide, régulier... uniquement s'il répond à ces critères.

Le but de cette étude est de décrire les expressions (loco) motrices induites par plusieurs types d'états émotionnels (la joie, la colère...). En particulier, l'analyse cinématique de la marche humaine a été effectuée pour ces différentes émotions en vue de caractériser des invariants locomoteurs spécifiques à chaque émotion. Cette étude concerne à la fois l'étude des trajectoires locomotrices mais également celle de la coordination inter segmentaire. Nous avons ainsi pu observé que d'un point de vue cinématique, les émotions « joie » et « colère » d'une part, et les émotions « peur » et « tristesse » sont très semblables. Cette similarité des démarches à l'intérieur d'une « paire » d'émotions résulte en des ambiguïtés perceptives : après visualisation de centaines de films enregistrés, des sujets (naïfs) ont confondu une démarche émotionnelle avec une autre démarche d'une même paire. Une analyse des démarches les mieux reconnues a permis de spécifier, à l'intérieur de chaque paire, les paramètres de marche spécifiques à chaque émotion. Nos travaux pourront avoir des applications dans le domaine de l'animation graphique (faire exprimer des émotions à des personnages virtuels).

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

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

Des études éthologiques et psychologiques-expérimentales présentent des indices de deux stratégies principales d'encodage de l'information spatiale pendant la navigation en de nouveaux environnements chez les insectes et les rongeurs : a) l'encodage des amers visuels et b) l'encodage de l'intégration de trajet. Ces études suggèrent que la première stratégie 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. À la présente étude, nous essayons mettre en évidence des indices de l'homologue système cognitif humain. Chez les animaux (des insectes aux mammifères) la capacité d'intégration du chemin (retour au gîte) est active.

4.7.1. ÉTUDE DU RÔLE DU GENRE À L'ORIENTATION SPATIALE ET À LA MÉMORISATION DES TRAJETS NAVIGUÉS

M. DE GOEDE, P. PANAGIOTAKI, A. POSTMA, A. BERTHOZ. Étude commune avec l'Université d'Utrecht dans le cadre du projet Européen Wayfinding

Le thème particulier de cette recherche est de mettre en évidence chez l'homme au moyen des études comportementales a) les stratégies cognitives engagées pour le traitement et l'intégration des informations multisensorielles pendant la navigation spatiale et la mémorisation du trajet navigué, chez les hommes et les femmes. Les deux stratégies contrôlées sont a) la stratégie basée aux amers visuels (landmark-based strategy) et b) la stratégie de la configuration géométrique (geometric-based strategy). Les participants naviguent dans des trajets prédéfinis (avec l'aide d'un casque de réalité virtuelle) dans la ville virtuelle Magnapolis2©, et ils effectuent des tâches de reproduction du trajet appris et de reconnaissance des amers visuels d'orientation vers le point initial et le point final de chaque trajet dans trois conditions : 1. Condition de présence des amers visuels et des éléments géométriques (bâtiments). 2. Condition de présence seule des éléments géométriques. 3. Condition de présence seule des amers visuels.

4.7.2. REPRÉSENTATION ET PROCESSUS VISUO-SPATIAUX DANS LE MICRO ET LE MACRO-ESPACE CHEZ DES SUJETS SAINS ET CHEZ DES PATIENTS ÉPILEPTIQUES

P. PANAGIOTAKI, A. BERTHOZ (LPPA), L. PICCARDI, C. GUARIGLIA (Université La Sapienza, Rome). Projet Walking Corsi Test dans le cadre du projet européen Wayfinding

Cette étude est menée chez des patients épileptiques pré- et post- opératoires souffrant d'une épilepsie partielle pharmacorésistante en cours d'évaluation pré-

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

4.8. LA DIFFÉRENCE ENTRE LA SYMÉTRIE PAR ROTATION ET LA SYMÉTRIE PAR RÉFLEXION AU COURS DE L'INTERACTION AVEC AUTRUI ET LEUR CORRÉLATION AVEC L'EMPATHIE ET LA SYMPATHIE : ÉTUDE EN EEG ET PSYCHOPHYSIQUE
B. THIRIOUX, A. BERTHOZ (LPPA), M. MERCIER, O. BLANKE (LNCO, EPFL, BMI, Lausanne, Suisse), G. JORLAND (EHSS)

Une première étude en psychophysique (Temps de Réaction, Durée et Amplitude du mouvement) a permis de (1) distinguer deux types de comportements moteurs à l'oeuvre dans l'interaction sociale : la symétrie par rotation (si un sujet A se penche sur sa droite, un sujet B face à lui se penchera aussi sur sa droite et inversement) et la symétrie par réflexion (si un sujet A se penche sur sa droite, un sujet B face à lui se penchera sur sa gauche et inversement) et (2) de montrer que la première est utilisée spontanément dans le rapport à autrui. (3) Ces résultats nous ont conduit à confirmer une corrélation jusque là postulée entre symétrie par rotation et empathie d'une part et symétrie par réflexion et sympathie d'autre part : la sympathie serait sous-tendue par des mécanismes cérébraux qui nous permettent d'interagir avec les autres mais sans changer de point de vue alors que l'empathie supposerait un changement de perspective. À partir de cette observation, nous avons reproduit partiellement ce protocole au cours d'une expérience en EEG sur une population de 13 sujets sains qui visait à observer le comportement spontané des sujets en interaction avec la même funambule virtuelle (précédemment utilisée) se penchant à gauche et à droite et présentée de Face ou de Profile, et leur imposait une tâche d'Own Body Transformation (OBT) (dans laquelle les sujets devaient procéder à une symétrie par rotation) et une tâche de Mirroring (dans laquelle les sujets devaient procéder à une symétrie par réflexion). Au niveau comportemental, les résultats obtenus confirment les précédents : les sujets procèdent spontanément à une Symétrie par Rotation. La comparaison des Temps de Réaction de la Symétrie par Rotation spontanée et de l'OBT imposée montre que les sujets procèdent à une OBT spontanée. Ce résultat est en outre confirmé par les résultats EEG qui sont en cours d'analyse.

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

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

Les études récentes en imagerie fonctionnelle et stimulations électriques intracérébrales ont permis de localiser un réseau d'aires activées lors de la génération de saccades oculaires. Toutefois, la séquence temporelle d'activation de ces structures corticales n'a jamais été définie précisément chez l'homme. Notre étude repose sur des enregistrements EEG intracrâniens de patients épileptiques. Les composantes spectrales rapides (bande gamma, > 40 Hz) présentent des modulations au niveau des zones d'intérêt oculomotrices lors de la réalisation de protocoles cognitifs. Les structures activées lors des processus cognitifs de pré-saccades, sont les *FEF*, le *cortex préfrontal dorsolatéral* et le *gyrus cingulaire*. Lors des saccades, les mêmes structures sont impliquées, ainsi que les *SEF* et l'*opercule rolandique*. Nous avons par ailleurs mis en place un protocole expérimental de lecture (aspects de traitement syntaxique et sémantique). Les premières analyses montrent des synchronies dans la bande gamma entre des aires du *pôle temporal* et plusieurs aires du *cortex frontal*.

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

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

Notre projet de recherche porte sur la perception et la compréhension des comportements moteurs réalisés par autrui, qui jouent un rôle crucial dans la communication et l'interaction sociale. Le but est de décrire les mécanismes cognitifs et d'identifier les corrélats neuroanatomiques qui sont impliqués dans les capacités à comprendre la signification du comportement d'autrui, à détecter les intentions et les émotions qui sont à l'origine de ce comportement et qui leurs sont associés. Ce projet combine plusieurs approches, comportementales (performances et temps de réactions), physiologiques (conductance cutanée, fréquence cardiaque et respiratoire, EMG facial) et anatomie fonctionnelle (IRMf) chez le sujet normal et pathologique.

5.1. LA PERCEPTION DES ACTIONS D'AUTRUI

La perception d'une action est associée à des activations au sein de régions cérébrales connues pour leurs rôles dans préparation et l'exécution d'une action,

en particulier le cortex prémoteur et le cortex pariétal (Grèzes *et al.* 2003). Ces structures sont activées de façon plus prononcée lorsque l'action perçue appartient au répertoire moteur du sujet, et donc que le sujet est capable de reproduire, par rapport à une action n'appartenant pas à son répertoire moteur (Calvo-Mérino *et al.* 2004). De plus, ces activations ne sont pas dues à une familiarité visuelle mais uniquement à une familiarité motrice (Calvo-Merino *et al.* 2006). En collaboration avec le Dr C. Calmels, le projet actuellement en cours a pour but d'examiner si ce phénomène de résonance motrice est activé chez des sportifs de haut niveau blessés, sachant que ceux-ci sont temporairement dans l'incapacité de réaliser certains gestes en utilisant la technique d'IRMf. La gymnastique artistique a été choisie car c'est une des rares disciplines sportives où un/une athlète blessé(e) au membre supérieur (membre inférieur) peut poursuivre son entraînement en réalisant des mouvements sollicitant les membres inférieurs (membres supérieurs). Des films ont été réalisés, édités, validés. L'expérience en IRMf devrait débuter en Septembre 2007. Une meilleure connaissance du mode de fonctionnement du système résonance motrice pourrait avoir des implications directes par exemple dans le cadre de la rééducation.

5.2. LA PERCEPTION DES INTENTIONS D'AUTRUI

Le couplage entre les systèmes de représentations de l'action et ceux de l'intention est étudié dans le cadre d'un projet en collaboration avec Dr Sylvie Berthoz et Dr Bruno Wicker portant sur la détection de fausse croyance et de mensonge chez autrui à partir de la perception d'une action très simple, celle de porter une boîte. L'une des originalités de ce projet repose sur la prise en compte de différences interindividuelles dans les comportements socio-affectifs (empathie, alexithymie, anhédonie, anxiété, etc.). La comparaison intergroupe de trois groupes de témoins recrutés sur la base de leurs scores en empathie met en évidence qu'il existe une influence des différences interindividuelles dans les capacités socio-affectives sur les activations cérébrales associées à la détection d'intentions sociales complexes, ici le mensonge. À performances équivalentes, les hyper-empathiques présentent une activation plus importante du cortex cingulaire antérieur — préfrontal dorsal par rapport aux sujets normaux — et aux sujets hypo-empathiques. Cette région cérébrale est en particulier connue pour son rôle dans la formation d'impressions sociocognitives sur autrui (Mitchell *et al.* 2005).

5.3. LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS CORPORELLES ÉMOTIONNELLES D'AUTRUI

Cette partie du projet, en collaboration avec le Professeur Alain Berthoz, le Professeur Beatrice De Gelder et Swann Pichon, a pour but d'étudier les bases neurales associées à la perception d'expressions corporelles d'émotions (peur et colère) et de tester le couplage entre émotion et action. Les résultats des deux premières études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle suggéraient que la perception d'expressions corporelles de peur et de colère, par rapport à

une expression neutre, engage une étape supplémentaire, celle de se préparer à agir en réaction à l'émotion perçue (Grèzes *et al.* 2007, Pichon *et al.* 2007). Nous avons plus récemment réalisé l'étude sur la peur chez des sujets sains et des sujets Autistes — Asperger en collaboration avec le Dr Bruno Wicker. Les résultats montrent, chez les sujets autistes, des activations similaires aux témoins au sein du système de résonance motrice suggérant fortement que celui-ci est fonctionnel chez les patients autistes tandis que seuls les témoins présentent des activations au sein du système émotionnel (amygdale, gyrus frontal inférieur et cortex prémoteur). Des analyses de connectivité sur ces données montrent de plus que chez les patients, l'amygdale n'influence pas les autres régions du réseau, contrairement à ce qu'il se passe chez les témoins. La suite de ce projet consiste à explorer l'influence des processus ascendant et descendant sur le traitement des émotions en contrastant des situations de perception implicite à des situations de perception explicite d'émotions.

PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES

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

2006

CHERON, G., LEROY, A., DE SAEDELEER, C., BENGOETXEA, A., LIPSHITS, M., CEBOLLA, A., SERVAIS, L., DAN, B., BERTHOZ, A. & MCINTYRE, J. (2006) : Effect of gravity on human spontaneous 10-Hz electroencephalographic oscillations during the arrest reaction. *Brain Res.*, 1121 (1) : 104-116.

GIRARD, B., TABAREAU, N., BERTHOZ, A. & SLOTINE, J.J. (2006) : Selective amplification using a contracting model of the basal ganglia. *Neurocomp.*, 30-33.

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

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

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

MANFREDI, L., MAINI, E., LASCHI, C., DARIO, P., GIRARD, B., TABAREAU, N. & BERTHOZ, A. (2006) : Implementation of a neurophysiologic model of saccadic movements on an anthropomorphic robotic head. In IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid robots, pp. 438-443.

RONDI-REIG L., PETIT G., TOBIN C., TONEGAWA S., MARIANI J., BERTHOZ A. (2006) : Impaired sequential-egocentric and allocentric memories in forebrain

specific NMDA receptor knockout mice during a new task dissociating strategies of navigation. *J. Neuroscience*, 26, 4071-4081.

VIDAL M., AMORIM M.A., MCINTYRE J. & BERTHOZ A. (2006) : The perception of visually presented yaw and pitch turns : assessing the contribution of motion, static, and cognitive cues. *Percept Psychophys.*, 68 (8) : 1338-50.

2007

MILEA, D., LOBEL, E., LEHERICY, S. LÉBOUCHER, P., POCHON, J.B., PIERROT-DESSEILLIGNY, C. & BERTHOZ, A. (2007) : Prefrontal cortex is involved in internal decision of forthcoming saccades. *Neuroreport*, 18(12) : 1221-1224.

SCHMIDT, D., KRAUSE, B.J., WEISS, P.H., FINK, G.R., SHAH, N.J., AMORIM, M.A., MULLER, H.W. & BERTHOZ, A. (2007) : Visuospatial working memory and changes of the point of view in 3D space. *Neuroimage*, 36 (3) : 955-968.

Ouvrages

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

BERTHOZ, A., J.L. VERCHER (2006) : « Le traité de la réalité virtuelle, volume I : L'homme et l'environnement virtuel », Mines de Paris les Presses, collection Sciences Mathématiques et Informatique, 380 pages.

Chapitres d'ouvrages collectifs

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

Actes du Colloque ACI de Neurosciences intégratives et computationnelles, 89 communications, 269 pages.

Diffusion « Grand Public »

BERTHOZ, A. (2006) : « À la découverte de sens méconnus », *Découverte, Revue du Palais de la découverte*, mensuel octobre, N° 341, pages 41 à 54.

BERTHOZ, A. & PETIT, J.L. : sur France-Inter, émission Osmose, le 12 novembre 2006.

Conférences du professeur Berthoz sur invitation

2006

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

— « Le mouvement et les neurosciences intégratives », Journée de EDSM, Bruxelles, Belgique, 11 juillet.

— « Neural mechanisms of saccadic gaze control, Studies with FMRI intracranial recordings », International Symposium The Neurobiology of eye movements looking back and forth, Tuebingen, Allemagne, 28 juillet.

— « Les relations entre Psychologie et Neurosciences cognitives », Colloque L'essor des neurosciences, De la physiologie à la cognition : France 1945-1975, Paris, 21 septembre.

— « L'homme virtuel », Colloque du Collège de France, Paris, 13 octobre.

— « Le cerveau et l'espace », Journées d'études « Inventer l'espace ». Maison des Sciences de l'Homme, Paris. 19-20-21 octobre.

— « Mémoire de l'espace, stratégies de connaissance et pathologies », Colloque scientifique franco-israélien sur la mémoire. Conseil économique et social, Paris, 23 octobre.

— « The brain and space : neural basis of manipulation of reference frames and its implication for empathy », Conférence plénière, Lausanne Neurosciences Seminars, Lausanne, 11 décembre.

2007

— « Le problème des référentiels dans la perception du mouvement et de l'espace », Journée Jacques Paillard et son œuvre, CNRS, Marseille, 12 janvier.

— « La relation avec autrui : une question de point de vue ? », Réunion d'hiver « Moi et l'Autre, Bases neurales de la relation avec autrui », Musée de l'Homme, Paris, 22 et 23 janvier.

— « Décision et rationalité : aspects psycho-physiologiques », Journée d'études sur « L'action : délibérer, décider, accomplir ». Département de philosophie, ENS, Paris, 17 février.

— « Mémoire et Espace », Journées scientifiques du laboratoire de Psychologie et Neurosciences Cognitives. Hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris, 27 mars.

— « Étude de trajectoires locomotrices humaines par la commande optimale », Journées nationales de la Robotique humanoïde, LAAS-CNRS, Montpellier, 29 mars.

— « Neural basis of spatial memory ». Université de Chieti, Italie, 13 avril.

— « Modelling the saccadic circuitry using contraction analysis », ICRA'07 Workshop Neuro-Robotics : an interdisciplinary approach to the design of a new generation of high performance robots. Rome, Italie, 10 avril.

— « Simplifying principles for perception, action, locomotion and navigation. A common problem for brains and robots », Conférence plénière, ICRA'07 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italie, 11 avril.

— « Université, Recherche et Innovations », Table ronde aux Journées franco-italiennes 2007, nos universités face à l'Europe. Université de Sapienza, Rome, 16 mai.

— « Le cerveau stimulateur, émulateur, décideur : les différentes facettes de la notion de représentation », Conférence plénière, Colloque des jeunes chercheurs en Sciences Cognitives 2007, Lyon, 30 mai.

— « Anxiété spatiale », Colloque Recherche en psychiatrie : pathologies multiples, modèles communs ?, Collège de France, Paris, 1^{er} juin.

Organisation de réunions

2006

BERTHOZ, A. : Réunion du programme Human Frontier « Body Expressions of Emotion », Collège de France, Paris, 4, 5 et 6 octobre 2006.

BERTHOZ, A. : Réunion du programme COBOL « Communication with emotional body language », Collège de France, Paris, 7 et 8 décembre.

2007

BERTHOZ, A. & KEMENY, A. : Séminaire « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, 11 janvier 2007.

BERTHOZ, A. & PETIT, J.L. : Table ronde « Schématiser la constitution de l'espace », Collège de France, Paris, 5 avril.

BERTHOZ, A. : Réunion du programme COBOL « Communication with emotional body language », Collège de France, Paris, 18, 19 et 20 avril 2007.

BERTHOZ, A. & KEMENY, A. : Séminaire « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, 14 juin 2007.

BERTHOZ, A. & LAROCHE, S. : Colloque final ACI, Collège de France, Paris, les 11 et 12 juin 2007. 89 Communications avec actes.

Autres enseignements de A. Berthoz en 2006/2007

— Master de Neurosciences, Paris VI.

— Master de Sciences cognitives, EHESS, Paris VI.

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

— Membre du Comité des Programmes scientifiques du CNES.

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

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

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

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

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

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

— Membre du Conseil scientifique du NEUROPOLE Ile-de-France et du RTRA « École de Neurosciences de Paris ».

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

— Membre de la Commission de diffusion culturelle du Conservatoire des Arts et Métiers.

— Président du Comité d'évaluation du projet de l'Institut Marey, Marseille.

— Membre du Comité Scientifique de l'AIST-CNRS Joint Japanese-French Robotics Laboratory (JRL).

Collaboration de A. Berthoz avec l'Industrie

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

— Contrat avec la Société Peugeot.

Contrats de recherche et coopérations internationales

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

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

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

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

— Projet « Asymétries crano-faciales », Fondation Cotelre-Académie des Sciences (avec M^{me} D. Rousié).

— Projet NEST WAYFINDING n° 12959, FP6-2003-NEST-PATH de la Communauté européenne.

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

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