

## Physiologie de la perception et de l'action

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

### COURS : PLASTICITÉ ET VICARIANCE. LE CERVEAU ÉMULATEUR

L'accent du cours cette année a porté, non pas seulement sur la capacité remarquable du cerveau que l'on nomme « plasticité », mais sur une propriété plus générale, et plus remarquable, la « vicariance » et ce que j'appelle la « flexibilité fonctionnelle ». L'hypothèse centrale est que le cerveau est capable, lors d'une lésion, d'une pathologie génétique, ou d'un conflit sensoriel ou sensorimoteur, *non pas de réparer* mais de *remplacer* un système déficient par un autre. Il peut substituer une combinaison de réseaux nouveaux ou déjà présents dans le répertoire de chacun au réseau déficitaire. Cette flexibilité fonctionnelle est une des caractéristiques du vivant à tous ses niveaux et fait partie des propriétés générales que j'appelle « simplicité » (voir mon livre chez O. Jacob, 2009).

*Le premier cours* a été consacré à des rappels sur les notions de *cerveau simulateur et émulateur* et à une brève histoire de la notion de vicariance. Nous avons rappelé les développements récents de ce concept et en particulier les travaux sur le système des neurones miroirs, le concept et les mécanismes des *modèles internes*, l'existence et la nature des *illusions sensorimotrices*, etc.

Nous avons aussi défini le concept de « cerveau émulateur » en précisant qu'il y a plusieurs niveaux d'émulation à l'aide d'exemples, comme les membres fantômes, la flexibilité du schéma corporel (en décrivant une expérience du laboratoire), les expériences de sortie du corps, dont on découvre aujourd'hui les bases neurales et le rôle important joué par le cortex vestibulaire temporo-pariétal dans ces phénomènes. Nous avons brièvement abordé le problème des hallucinations, l'utilisation de palais mentaux pour la mémoire et le rôle de boucles ganglion de la base thalamo-corticales dans l'émulation de la réalité, en reliant ces questions aux bases neurales, qui impliquent en grande partie des liaisons « centrencéphaliques » avec le cortex et pas seulement des liaisons cortico-corticales, comme l'avaient suggéré Penfield et Fessard, et celui de l'existence des consciences multiples sur

lesquelles a récemment insisté Zeki. Nous avons mentionné le fait que le cerveau peut exprimer des consciences sans cortex et discuté le rôle possible des modèles internes dans l'élaboration des propriétés d'émulation et l'apparition de ce concept en robotique. Enfin, nous avons évoqué l'imagerie mentale comme forme très élaborée d'émulation. Nous en avons repris l'étude dans un cours ultérieur.

### La vicariance

Le concept de vicariance n'est pas nouveau. Il a été utilisé depuis longtemps par les spécialistes de l'évolution pour décrire les variations des espèces à partir de prototypes. Nous en avons donné un exemple dans un cas de batraciens. Dans une acception très différente, von Uexküll utilisait déjà le terme « *vicariousness* ». Il avait proposé le terme d'« *Umwelt* » pour décrire le fait que chaque organisme vivant est enfermé dans les limites étroites de « son monde ». On connaît l'exemple célèbre de la tique qui ne connaît du monde que l'acide butyrique et la chaleur. Mais il insiste sur le fait que les organismes vivants effectuent souvent la même action de façons très différentes. Pour lui aussi, la vicariance est également dans l'usage que nous faisons de la nature : « La tige de la fleur se métamorphose dans les cinq milieux de la jeune fille, de la fourmi, de la larve, de la cigale et de la vache. Elle est, pour chacune, porteuse de signification car elles utilisent respectivement la tige comme une parure, un chemin, un matériau de construction, une nourriture. » Nous avons récemment examiné dans un livre ce concept à la lumière des neurosciences modernes (A. Berthoz et Y. Christen, *The Neurobiology of Umwelt*, Springer 2008).

Enfin, nous avons précisé la conception centrale de ce cours en donnant un exemple de ce que j'appelle vicariance fonctionnelle. Il s'agit du remplacement du réflexe vestibulo-oculaire par les saccades (que j'ai nommé l'hypothèse de substitution saccadique) en cas de conflit visuo-vestibulaire produit par les prismes de Dove, phénomène que j'ai étudié et sur lequel j'ai publié avec G. Melvill-Jones.

L'idée générale d'une vicariance entre processus a été développée théoriquement et expérimentalement en France au siècle dernier par une école de psychologues, et en particulier Reuchlin dans les années 1950. En bref, pour ces psychologues, le concept de vicariance s'inscrit dans la ligne du *fonctionnalisme* : tous les comportements qui remplissent la même fonction peuvent être considérés comme équivalents et sont donc *substituables* les uns aux autres. Chaque individu disposerait de plusieurs processus vicariants pour s'adapter à la situation dans laquelle il se trouve. Certains de ces processus seraient plus facilement *évocables* que d'autres. La hiérarchie « *d'évocabilité* » serait en général différente d'un individu à un autre, pour des raisons pouvant tenir à la constitution génétique, à l'expérience antérieure ou encore à l'interaction entre ces deux catégories de facteurs. On doit aussi à T. Ohlmann dans les années 1990 et suivantes une théorie neutraliste de l'évolution et dynamique des processus vicariants. On trouvera ces idées dans J. Lautrey (éd.), *L'universel en psychologie*, Paris, Presses universitaires de France (p. 77-105).

### **Des outils importants de la vicariance et de la flexibilité fonctionnelle : l'imagerie mentale et motrice**

J'ai formulé l'hypothèse selon laquelle l'imagerie mentale n'est pas seulement un outil de « représentation » consciente qui serait superposé aux processus perception-action, mais serait un instrument fondamental de la capacité de vicariance et de plasticité fonctionnelle. La première question que nous avons posée est : l'imagerie mentale et motrice active-t-elle les mêmes mécanismes que la perception ? Pour illustrer les réponses à cette question, nous avons pris des exemples empruntés à des données et modèles de psychophysique et à la pathologie. Nous avons mentionné un travail fait avec S. Kosslyn et F. Mast, avec qui nous avons montré que la simple imagination d'un mouvement visuel, en l'absence de tout stimulus, peut modifier les changements de verticale perçue. Nous avons déjà écrit avec Melvill Jones, il y a quelques années, que la simple imagination peut modifier le gain du réflexe vestibulo-oculaire et avons décrit avec Vieilledent et Kosslyn le rôle de l'imagerie motrice dans l'apprentissage d'un espace de navigation.

Nous avons ensuite examiné plusieurs données récentes sur l'imagination motrice : la rotation imaginée du corps propre, la comparaison des réseaux activés pendant le mouvement imaginé et réel, une expérience de rotation mentale des mains et, enfin, la marche imaginée sur laquelle nous sommes revenus dans un cours ultérieur.

*Dans le deuxième cours* nous avons évoqué, très brièvement par rapport à l'étendue considérable de ce champ, les bases neurales de la plasticité fonctionnelle. Le but ici n'était pas d'en faire un résumé exhaustif mais de placer la plasticité dans le cadre de notre réflexion générale sur la notion de vicariance et de flexibilité, pour montrer en quoi ces deux dernières notions sont, à mon avis, différentes de la plasticité au sens strict, tout en l'intégrant pourtant.

Les périodes critiques sensorielles ou motrices du développement sont des moments d'expression de la plasticité chez l'enfant, mais un des résultats fondamentaux des dernières années est qu'il est possible de raviver des périodes critiques chez l'adulte. À la suite de lésions, cette plasticité du cerveau adulte permet de récupérer des fonctions par des mécanismes très variés : on peut citer l'équilibre entre inhibition et excitation neuronale et le rôle des protéines kinases (ERK, PKA), celui des facteurs de transcription (CREB), de la chromatine, du NMDA, de facteurs neurotrophiques (NGF, BDNF), de divers neuromodulateurs (acétylcholine, noradrénaline, dopamine / motivation, attention, intérêt, plaisir) et enfin de l'expérience.

Nous avons plus particulièrement approfondi les mécanismes de la « période critique », au cours du développement, en mentionnant les mécanismes cellulaires et moléculaires de la plasticité du cortex visuel et en nous basant sur les travaux de T. Hensch et de notre collègue A. Prochiantz, comme par exemple le transfert de l'homéoprotéine OTx2 dans le cortex visuel, dépendant de l'expérience. Nous avons aussi décrit d'autres composantes de cette plasticité.

Mais, notre objectif étant d'étudier la flexibilité chez l'adulte, nous avons surtout étudié les formes de *plasticité chez l'adulte*. Par exemple, la plasticité neuronale dépend de modifications synaptiques liées à la *distribution temporelle* des potentiels d'action pré- et post-synaptiques (*spike-timing dependent plasticity*, STDP) : l'association temporelle très précise, par paires, d'un stimulus sensoriel avec un autre, modifie les propriétés de détection des neurones sensoriels. Pour l'audition, par exemple, dans le cortex auditif primaire des animaux, l'association par paires de sons (tons purs) induit des changements dans la sélectivité des neurones pour les sons. Cette plasticité dépend de coïncidences temporelles dont la précision est de l'ordre de la milliseconde. Ce mécanisme est fondamental pour la plasticité du système auditif de l'adulte. De plus, la *valeur émotionnelle ou la pertinence* d'un stimulus peut influencer l'intégration d'informations nouvelles sur le monde et la plasticité des circuits. Par exemple, le noyau « basalis » interagit avec des circuits corticaux dans le cortex auditif du rat (AI). L'association par paires de la stimulation du noyau basalis, cholinergique, avec une stimulation sensorielle, produit un déplacement des fréquences des stimuli préférés par les neurones du cortex. Cette association induit une réduction rapide d'inhibition synaptique en quelques secondes, suivie par une large excitation spécifique aux stimuli associés. Cette période de *désinhibition* peut être un mécanisme fondamental de la plasticité et pourrait servir comme une trace mémorielle pour des stimuli ou des épisodes qui ont acquis une signification.

### **Stratégies émergentes pour une récupération fonctionnelle**

Des stratégies émergentes ont été décrites pour la récupération fonctionnelle basée sur le développement normal. Par exemple :

(a) Rééquilibration des rapports excitation/inhibition. Dans le cerveau immature l'excitation domine. La période critique établit un équilibre entre excitation (E) et inhibition (I) grâce à un développement tardif de l'inhibition. Une stratégie pour retrouver la période critique consiste à modifier l'équilibre E/I pour retrouver un état de période critique. Diverses méthodes permettent ceci (l'infusion de chABC, l'enrichissement environnemental, la fluoxétine chronique, etc.) ;

(b) Suppression des freins moléculaires : dans le cerveau adulte, des molécules consolident l'état acquis et constituent des « freins moléculaires » à toute modification plastique. Leur suppression représente une possibilité pour retrouver la plasticité.

De plus, des neurones dont la maturation se produit chez l'adulte peuvent avoir des propriétés plastiques de type « période critique » à différents moments de leur maturation : entre 1 et 1,5 mois d'âge, certains neurones du noyau dentelé nés chez l'adulte ont une potentiabilité accrue à long terme. La plasticité chez ces neurones dépend de l'expression synaptique régulée de récepteurs NMDA contenant NR2B. Une découverte intéressante dans ce domaine a été faite sur *l'interaction réciproque du sommeil et de la plasticité* : l'apprentissage perceptif visuel est amélioré par le sommeil à ondes lentes. L'expérience sensorielle affecte la qualité du sommeil consécutif. Une déprivation sensorielle précoce réduit le sommeil à ondes lentes.

La possibilité de retrouver une plasticité des réseaux neuronaux chez l'adulte ouvre des perspectives nouvelles pour la récupération fonctionnelle. Nous avons cité un exemple d'un cas de réorganisation précoce des voies visuelles chez un enfant né avec un seul hémisphère. Elle révèle la capacité remarquable du cerveau pour se réorganiser.

### **D'autres exemples plus intégrés du caractère modifiable du fonctionnement neural**

Les déplacements du corps perçu et vécu sont liés à la remarquable *flexibilité du schéma corporel*. Par exemple, l'enregistrement par MEG de l'activité dans SI pendant une illusion du type « main de caoutchouc » induit une modification de la topographie tactile en même temps que s'établit l'illusion perceptive. De plus, on connaît la plasticité du système somato-sensoriel. On sait que l'exercice modifie les cartes corticales sensorielles et motrices (musiciens, crampe de l'écrivain, amputés, etc.) et même l'hippocampe (chauffeurs de taxi). Nous avons évoqué les travaux pionniers de Michael Merzenich sur la plasticité sensorielle : « *With very limited manual exercise, over a total period of a few hours of practice at a skill played out in brief daily sessions, over a several week long training period, the representations of skin surfaces crucial for successfully performing a small-object retrieval were substantially remodeled in the S1 somatosensory cortical fields. Skin surfaces were represented in a much finer representational grain than normal.* »

On a pu aussi mettre en évidence, chez le singe, une grande variété de stratégies d'acquisition lors d'une tâche de saisie d'un objet. Cette variété est accompagnée d'une réorganisation corticale des représentations neurales des doigts dans l'aire 3b du singe adulte. D'autres preuves de réorganisation de réseaux fonctionnels neuronaux au cours d'un apprentissage ont été trouvées chez le rat. Par exemple, une réorganisation immédiate et simultanée du système somato-sensoriel aux niveaux cortical et sous-cortical a été décrite : les neurones enregistrés ne donnent pas normalement de réponse à la stimulation des moustaches (vibrisses) C3. Mais après injection de LIDOCAINE sous-cutanée, on observe une réponse qui était masquée dans de nouveaux sites et qui révèle une réorganisation de SpV, VPM et SI.

La récupération motrice et corticale après hémisection de la moelle est un autre modèle sur lequel ont porté les travaux. La lésion induit une perte de la sensibilité tactile de la patte antérieure. Les réponses du cortex S1 à la stimulation tactile de cette patte disparaissent après lésion. On observe, après entraînement, une récupération de la fonction motrice (due à la partie proximale de la patte), mais une absence de récupération de la sensibilité tactile corticale (due à la partie distale tactile de la patte).

Après la plasticité sensorielle, nous nous sommes intéressés à la plasticité motrice. La présence de connexions redondantes sous-liminaires qui peuvent être démasquées pourrait aussi aider à l'établissement de processus vicariants pour la récupération fonctionnelle. Les modifications des cartes corticales du cortex moteur M1 par l'entraînement lors de tâches de manipulation fine chez le singe constituent un

modèle intéressant. La plasticité corticale se produit grâce à des modifications locales modulées par les récepteurs NMDA. Mais d'autres mécanismes, comme les oscillations lentes spontanées dans le cerveau, contribuent à la plasticité fonctionnelle : par exemple, les neurones pyramidaux de l'aire CA3 dans des tranches d'hippocampe sont le siège de potentiels spontanés avec des oscillations bistables du potentiel de membrane. Cette activité spontanée induit une plasticité synaptique durable liée à la concentration intracellulaire de calcium dans la membrane post-synaptique. *Cette plasticité induite par des oscillations lentes produit dans un réseau récurrent une convergence sur un état plus spécifique que celui obtenu avec une plasticité dépendante de l'organisation temporelle des potentiels d'action seulement.*

Par ailleurs, la neurogenèse chez l'adulte, récemment découverte et documentée, est un facteur fondamental de la capacité de récupération fonctionnelle. Cette capacité s'étend aux fonctions cognitives. On peut donc se demander si elle contribue à la constitution de mémoires. Il a été démontré que la plasticité par contiguïté temporelle, associée à la neurogenèse, caractérise notre mémoire autobiographique et l'entraînement de la mémoire de travail induit un accroissement de densité des récepteurs D1 de la dopamine corticale.

### **Plasticité et vicariance chez le sujet âgé**

Le cerveau de personnes âgées peut maintenir un niveau de performance relativement élevé malgré les changements associés au vieillissement. La stabilité de la performance est maintenue en engageant de nouvelles régions du cerveau et en élaborant de nouvelles stratégies cognitives. Ceci peut être démontré en comparant les performances dans des tâches de mémorisation d'images chez des jeunes et des adultes et en manipulant l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral par stimulation magnétique transcrânienne. Les données suggèrent que le cerveau est un organisme dynamique qui tend, selon certains, à maintenir une sorte « d'homéostasie cognitive ». D'ailleurs, l'activité corticale tend à augmenter paradoxalement avec l'âge au cours de tâches cognitives, surtout dans le cortex frontal et préfrontal. Cette observation est interprétée comme le témoin de l'élaboration par le cerveau de stratégies alternatives par le recrutement de circuits additionnels. Nous avons donné plusieurs exemples de travaux récents sur ce sujet.

### **Différences entre les sexes pour des tâches cognitives**

*Le troisième cours* a porté sur un aspect important de la vicariance : la remarquable variété des solutions pour l'apprentissage et en particulier sur la question des variations inter- et intra-individuelles et différences entre les sexes.

Dans des tâches de perception et d'intégration multisensorielles ou motrices, ou dans des situations de récupération fonctionnelle après lésions vestibulaires, certaines personnes sont plus « visuelles » d'autres plus « proprioceptives ». Dans des tâches spatiales, les femmes préfèrent les stratégies « égocentrées », les hommes des stratégies « allocentrées ». Les processus vicariants ne seront pas les mêmes chez les hommes et chez les femmes. Les cerveaux des hommes et des femmes n'ont pas la même

distribution de volumes. Une asymétrie du cortex pariétal pourrait aussi contribuer à des différences entre sexes. L'asymétrie des deux hémisphères pourrait être régulée par les androgènes qui induiraient une augmentation de la taille du cortex droit chez les hommes. Les aires du cerveau activées pendant la navigation et le traitement de l'espace ne sont pas les mêmes, etc. Les hommes et les femmes, ainsi que les anxieux et non anxieux, ne s'adaptent pas de la même façon à un conflit sensoriel. Nous avons aussi montré avec S. Lambrey (l'étude a été publiée) une différence entre hommes et femmes dans une expérience scientifique dans un environnement réel (un supermarché). Les hommes sont meilleurs que les femmes dans des tâches de rotation mentale. Les hommes sont meilleurs que les femmes pour le changement de point de vue (rotation mentale dans l'espace). Les hommes sont plus performants dans des tâches de rotation mentale pour trouver une plateforme cachée dans le labyrinthe de Morris virtuel. Les garçons sont plus performants pour un transfert du virtuel au réel dans le labyrinthe locomoteur de Kiel (trouver 5 cibles dans 20 endroits marqués par des lumières rouges au sol. On entraîne les sujets (enfants de 11 ans) sur un écran (réalité virtuelle) et on teste le transfert sur le sol réel en locomotion. Les femmes sont meilleures pour identifier les objets qui ont bougé (le jeu des sept erreurs). La vitesse perceptuelle : les femmes sont meilleures (deux rangées de symboles, l'une au-dessus de l'autre). On demande au sujet de placer en bas les chiffres qui correspondent aux symboles du haut. Les femmes sont meilleures pour toute tâche qui peut être faite avec une médiation verbale. Les femmes sont meilleures pour mémoriser des formes signifiantes 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. Les hommes ont une meilleure mémoire des cartes. On dessine une route avec un pointeur devant le sujet ; le sujet doit reproduire ce trajet de mémoire. Nous avons rappelé des résultats du laboratoire sur la différence entre les sexes pour la navigation et la mémoire spatiale, etc.

### **Bases hormonales des différences entre les sexes**

Chez les femmes, le cycle menstruel influence la performance lors de la navigation. Chez la rate, des expériences ont montré que la stratégie utilisée par l'animal pour mémoriser un trajet dépend du moment dans le cycle de l'oestrus. Les oestrogènes jouent donc un rôle important dans la performance des femmes dans des tâches spatiales. Chez l'homme, ce sont les taux de testostérone qui sont importants. La différence est particulièrement significative concernant les tâches « masculines » c'est-à-dire celles que les hommes réussissent mieux. Les hommes avec des taux de testostérone bas ont une meilleure performance que ceux avec des taux élevés. La puberté est un moment important. Toutefois les différences entre les sexes pour les habiletés spatiales apparaissent même avant la puberté, très tôt dans l'enfance. En ce qui concerne l'influence de l'éducation sur les différences entre les sexes, elle est incontestable, mais n'est pas un facteur fondamental : « The presence of parallel sex differences in non human species raises doubt about human child rearing practices as major influences on the sex difference in cognitive pattern » (D. Kimura).

La latéralisation est aussi un facteur important de la vicariance car, par exemple, les aires activées pendant l'imagerie motrice sont différentes entre droitiers et gauchers. L'imagerie motrice n'est donc pas abstraite mais incarnée dans les mécanismes de l'exécution.

### **Influence de l'expérience**

Nous avons consacré une part importante du cours au rôle de l'expérience. La matière blanche (fibres) est modifiée par la pratique précoce de la musique. Étude sur l'influence du piano pour l'enfant, l'adolescent, l'adulte. La voie pyramidale est plus structurée chez les pianistes que chez les non musiciens. L'entraînement perceptif intensif chez l'adulte peut compenser les déficits des périodes critiques. Nous avons pris l'exemple de l'audition. La capacité de discriminer des sons disparaît chez des rats élevés dans un bruit intense pendant la période critique auditive. Elle peut être restituée par l'entraînement perceptif. L'imagerie et l'émulation mentale peuvent induire des modifications du cerveau au même titre que l'expérience. Le volume de matière grise augmente avec l'ancienneté chez les mathématiciens. Il est aussi possible de faire un apprentissage perceptuel par imagerie mentale et de modifier la dopamine corticale (récepteur D1).

### **Un modèle de vicariance : l'adaptation duale**

Un modèle particulièrement intéressant de vicariance est l'adaptation duale. Par exemple, nous pouvons apprendre à conduire à gauche ou à droite et garder ces deux modes de comportement, au risque de provoquer d'ailleurs des accidents. Nous pouvons aussi, lors de voyages spatiaux, nous adapter à la microgravité (voir les travaux de notre laboratoire) mais retrouver très rapidement le mode terrestre au retour sur Terre, ce qui suggère que notre cerveau peut garder une mémoire des contraintes et des lois de la gravité terrestre qui, nous l'avons démontré il y a quelques années, sont internalisées dans des « modèles internes ». De même, après un long séjour en mer, le cerveau peut maintenir un mécanisme remarquable d'adaptation au mouvement des vagues et donner lieu à ce que l'on nomme le « mal de débarquement » qui est l'illusion de soulèvement rythmé du sol, indice de la création pendant la navigation sur la mer d'un *pattern* neuronal de décharge rythmique compensant les mouvements de la mer. De nombreux exemples sont aussi à trouver dans les conflits sensoriels. Nous avons décrit une expérience de navigation spatiale en réalité virtuelle, avec conflit sensori-moteur. Elle a permis de tester deux modèles sur le rôle du contexte perceptif dans le passage d'une stratégie à une autre, pendant une adaptation duale. Les résultats ont montré que deux groupes de sujets utilisent des stratégies différentes, qui correspondent en fait aux deux modèles.

### **Remédiation ou réhabilitation ?**

*Le quatrième cours* a porté sur la réhabilitation, ou plutôt la « *remédiation* » des troubles du développement cognitif et moteur chez l'enfant et la personne âgée. Nous avons tout d'abord fait quelques rappels d'anatomie et de physiologie sur les

bases neurales de l'apprentissage moteur, sensoriel ou mental, le contrôle cortical des séquences d'action, et le rôle des ganglions de la base dans la sélection de l'action et leur intervention dans l'acquisition des habitudes extrêmes et des rituels. Nous avons noté que la dynamique de l'apprentissage se manifeste par un déplacement de l'activité dans le cerveau pendant l'acquisition d'habitudes. Nous avons mentionné, parmi les théories modernes, l'hypothèse de « compétition d'affordances ». En effet, deux taxonomies sont possibles pour décrire les mécanismes de sélection de l'action : a) la taxonomie « classique » : perception, cognition, action, basée sur une conception sérielle des processus neuronaux ; b) une nouvelle taxonomie qui suppose que le cerveau traite les informations de façon parallèle et non sérielle diverses actions possibles pour accomplir la même fonction ou arriver au même but. Ces différentes possibilités seraient en compétition pendant que des informations seraient recueillies par le cerveau pour biaiser la décision vers l'une ou l'autre des actions possibles, jusqu'à ce qu'une seule soit choisie (quand tout va bien). Par exemple, le système visuel dorsal spécifierait des actions qui seraient en compétition au sein du cortex pariéto-frontal et des influences seraient reçues du cortex préfrontal et des ganglions de la base.

D'autres théories ont été envisagées, comme l'idée que deux réseaux parallèles seraient utilisés pour l'apprentissage de procédures séquentielles : dans un des réseaux, les données seraient traitées en coordonnées spatiales et dans l'autre en coordonnées motrices. Enfin, nous avons décrit un modèle original d'apprentissage sensori-moteur en robotique humanoïde. Ce modèle suppose l'émergence de hiérarchies fonctionnelles dans un modèle à échelles temporelles multiples. Ni il n'utilise de modules neuronaux séparés pour représenter des primitives motrices, ni il n'introduit de hiérarchies explicites. La hiérarchie fonctionnelle émerge d'une sorte d'auto-organisation basée sur deux types distincts de neurones dotés de propriétés temporelles différentes. C'est à travers l'introduction d'une multiplicité d'échelles temporelles que des séquences continues de comportement sont segmentées en séquences primitives, utilisables de façon très flexible dans de nouvelles séquences de mouvement.

### **Modification de l'organisation fonctionnelle cérébrale chez l'enfant**

Nous avons aussi décrit les bases neurales du développement des capacités cognitives de l'enfant qui sont fondamentales dans l'élaboration des capacités de flexibilité du cerveau adulte. On sait que plusieurs familles de théories ont été proposées pour rendre compte de cette maturation fonctionnelle qui peut aboutir grâce à : a) la maturation d'une région, par exemple le rôle du cortex frontal dorsolatéral ; b) le 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 ; c) 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.

Une autre approche a consisté à identifier des réseaux fonctionnels et à en étudier le développement. Il existerait quatre réseaux principaux: cingulo-operculaire, fronto-parietal, cérébelleux et un réseau appelé de « défaut » qui est l'activité considérable dont le cerveau est le siège lorsque nous pensons nous reposer. L'anatomie a révélé que ces réseaux évoluent d'un fonctionnement « local » vers un fonctionnement « distribué » au cours du développement. Les connections à courte distance tendent à diminuer avec l'âge au profit de connections à longue distance.

Une autre approche sur les réseaux fonctionnels consiste à comparer les réseaux utilisés pendant l'imagerie mentale ou motrice et les réseaux utilisés pendant l'exécution ; nous avons longuement décrit les travaux récents concernant la marche. Nous avons d'abord fait un rappel sur les aspects comportementaux de la marche, par exemple : a) il y a isochronie entre marche réelle et marche imaginée ; b) la trajectoire locomotrice est anticipée par la tête et le regard ; c) cette anticipation résulte d'une simulation mentale de la trajectoire désirée. Elle apparaît au cours de l'ontogenèse, etc.

Nous avons ensuite examiné des travaux récents d'imagerie cérébrale sur les réseaux neuronaux de la marche imaginée et exécutée et la découverte récente d'une participation importante de l'hippocampe et du para-hippocampe pendant la marche.

### **La compensation des déficits moteurs chez la personne âgée.**

#### **Flexibilité fonctionnelle et vieillissement**

On connaît les déficits moteurs de la personne âgée : augmentation des oscillations du corps, plus grande activité musculaire, réduction de la détection vestibulaire et articulaire des mouvements du corps, réduction de la sensibilité de la voûte plantaire, diminution de la contribution des afférences proprioceptives musculaires et des réflexes spinaux, faible force musculaire des muscles extenseurs anti-gravitaire, diminution de la capacité du cerveau à intégrer des informations multi-sensorielles et à sélectionner des informations, etc.

On sait aujourd'hui que *l'imagerie mentale* permet une récupération partielle de fonctions. Par exemple, chez des patients ayant subi une attaque, une séance quotidienne d'entraînement mental a suffi pour induire une modification du globus-pallidus interne *chez les patients parkinsoniens*. D'autres études en fMRI ont montré une réorganisation spécifique du cortex prémoteur par l'entraînement mental. De façon générale, les personnes âgées qui maintiennent une activité cognitive élevée ont moins de déclin. Les sujets actifs recrutent des aires cérébrales nouvelles. Des modèles animaux du vieillissement confirment ces données. Nous avons passé en revue plusieurs expériences dans ce domaine.

#### **Émotion et vicariance et compensation des déficits**

Le cinquième cours a été consacré au rôle de l'émotion, de la motivation et de l'enrichissement dans la compensation des déficits cognitifs et moteurs. Nous avons d'abord rappelé l'exemple célèbre des nonnes qui n'ont pas montré les

symptômes de l'Alzheimer, probablement en raison d'une intense activité cognitive et comportementale. Mais nous avons mis l'accent sur le rôle de l'émotion dans l'apprentissage. Par exemple, la plasticité corticale liée à l'apprentissage de la discrimination d'un stimulus auditif est augmentée si on associe une récompense au stimulus. Ceci suggère l'importance du système limbique (émotions, valeur) dans la plasticité. Nous avons, pour ce cours, fait un rappel des bases neurales de l'émotion que nous avons développées dans un cours précédent. Puis nous avons décrit un travail récent qui identifie six groupes fonctionnels de neurones participant aux émotions.

Ce cours a été en partie consacré à des exemples cliniques, comme la remédiation de l'anxiété spatiale, pour illustrer l'importance de la vicariance. Par exemple, l'agoraphobie résulte d'une variété de contextes phobogène. Pour la compenser, il existe une variété de possibilités d'évitements partiels : horaires et places spécifiques dans les lieux publics, modification des trajets (éviter les tunnels, ponts, embouteillages), changements d'horaires et de lieux pour les courses, limitation des déplacements en train (omnibus, ouvertures, vitesse), changement de travail, déménagement, évitement attentionnel, etc. Parmi les outils nombreux de la remédiation on peut citer : les thérapies comportementales et cognitives par exposition, l'habituation par exposition graduée, l'utilisation de la réalité virtuelle. Ces méthodes sont utilisées pour les cas des troubles liés à des expériences traumatiques.

### **Effet de l'enrichissement environnemental**

Chez l'animal, une des découvertes les plus importantes des années récentes a été l'effet considérable de l'environnement enrichi sur le développement du cerveau et le comportement. On a trouvé une augmentation de l'épaisseur corticale, de la densité d'épines dendritiques et de leur complexité. L'environnement enrichi permet l'activité volontaire avec des buts endogènes. Nous pensons qu'il s'agit là d'un des fondements essentiels de la capacité ultérieure de vicariance.

On a maintenant identifié les facteurs cellulaires et moléculaires qui induisent des changements à long terme liés à l'expérience active. Un facteur essentiel est le récepteur pour le glutamate le NMDA, crucial dans la détection de coïncidence entre activité pré- et post-synaptique. Mais d'autres facteurs sont importants, comme l'équilibre entre inhibition et excitation dont nous avons vu l'importance pour les périodes critiques, des protéines kinase (ERK, PKA), des facteurs de transcription (CREB), la chromatine, des facteurs neurotrophiques (NGF, BDNF), des neuromodulateurs (acétylcholine, noradrénaline, dopamine), des composants des matrices extracellulaires et des enzymes de dégradation, etc.

Chez l'humain, l'effet de l'enrichissement est aussi majeur. Nous avons décrit une étude sur 147 jumeaux engagés de façon différente dans des activités physiques ou cognitives, qui a montré une différence dans le risque de démence. Une autre étude portant sur 6 434 hommes et femmes de plus de 65 ans montre qu'une activité physique modérée ou haute diminue le risque de Alzheimer et que des

activités cognitives élevées diminuent le risque de perte de performance cognitive chez les femmes. Enfin, une autre étude utilisant les techniques de résonance magnétique montre que 12 semaines d'exercice physique (1 h par jour, 4 jours par semaine) induit un accroissement de circulation sanguine dans l'hippocampe.

En conséquence, les capacités de vicariance et de flexibilité fonctionnelle du cerveau sont considérables et les neurosciences modernes associées à la physiologie et la psychologie éclairent de façon remarquable cette capacité et donnent des perspectives remarquables pour la compensation de déficits cognitifs et moteurs dans un large spectre de pathologies et d'optimisation des facultés au cours du développement et au cours de toute la vie chez les sujets sains.

#### COURS À L'ÉTRANGER

Université de Copenhague, Danemark : « Simplifying principles ("simplicity") for perception and the brain control of movement and locomotion », 21 juin 2010.

Prague, République tchèque: Université Charles, département de neurologie : « Neural basis of empathy and sympathy » & Faculté de médecine: « The brain, space and movement: neural basis, pathology and rehabilitation », 26 mai 2010.

Centre Interdisciplinaire d'anthropologie historique - Université de Berlin (Dahlem) : « Une théorie spatiale des bases neurales de l'empathie », 21 mai 2010.

Université Bauhaus de Weimar, Allemagne : « Simplifying Principles for Brains, Robots and Brain-Machine Interfaces », 19 mai 2010.

Stockholm Brain Institute, conférence au Forum Nobel - Karolinska Institute, Stockholm, Suède: « Neural basis of spatial orientation and spatial memory for navigation. Studies with fMRI and intracranial recordings in epileptic patients », 12 avril 2010.

#### SÉMINAIRE 1 : EN RELATION AVEC LE SUJET DU COURS

**20 janvier**, Ann Graybiel (*Massachusetts Institute of Technology. Department of Brain and Cognitive Sciences*) : « Habitudes, rituels, et le cerveau évaluatif » (en anglais avec traduction).

**27 janvier**, Jean-Marie Lledo (*Institut Pasteur*) : « Adaptation et flexibilité des mécanismes de la perception et de la mémoire par la neurogenèse du cerveau adulte ».

**3 février**, Christopher Wulf (*Centre Interdisciplinaire d'anthropologie historique. Université de Berlin*) : « Apprentissage culturel et mimesis : rituels, gestes et jeux ».

**10 février**, Hans Forssberg (*Karolinska Institut. Stockholm*) : « Plasticité et apprentissage moteur chez des enfants ayant des troubles fonctionnels : plasticité et règles du développement » (en anglais avec traduction).

**17 février**, Itzhak Fried (*UCLA School of Medicine. Department of Neurosurgery, UCLA, Los Angeles*) : « Neurochirurgie des réseaux épileptogènes et fonctionnels : plasticité et récupération fonctionnelle » (en anglais avec traduction).

**10 mars**, Pierre Burbaud (*CNRS. Faculté de Médecine Bordeaux*) : « Processus de plasticité et de réorganisation après lésion cérébrale » ; J.P. Lachaux (*INSERM. Lyon. Hôpital Nord, Grenoble*) : « Modifier l'activité de son cerveau grâce à aux interfaces cerveau-machine. Implications pour la neuro-réhabilitation ».

**17 mars**, Leçon de clôture de la chaire de Physiologie de la perception et de l'action : « Projets et utopies ».

SÉMINAIRE 2 : *SENSORIMOTOR COMPUTATION: THE CONTROL OF GAZE*

Sous la forme d'un colloque organisé en collaboration avec le Pr. D. Pai et le Peter Wall Institute of Advanced Studies/Université de Colombie britannique de Vancouver, le **3 mai 2010**.

Dianne Newell, *Director of the PWIAS, Canada* and Alain Berthoz : *Opening remarks*.

Dinesh Pai, *Professor and Canada Research Chair, University of British Columbia, PWIAS, Canada* : « Overview, and Biomechanics of the Oculomotor System ».

Kathleen Cullern, *Professor and William Dawson Scholar, McGill University ; PWIAS, Canada* : « The dynamic regulation of multimodal integration in the control of gaze ».

Klaus Hepp, *Professor at the Institute for Theoretical Physics, ETH Zürich, Switzerland* : « A biologically realistic cortical model of eye movement control in reading ».

Jeroen Goossens, *Assistant professor at the Radboud University Nijmegen Medical Centre, The Netherlands* : « Neural control of saccade kinematics and gaze trajectories ».

Christopher Harris, *Professor of neuroscience at the University of Plymouth, UK* : « Optimizable Hamiltonians for Oculomotor Control: Beyond Physiology ».

Daniel Bennequin, *Professor of mathematics at the University Denis Diderot Paris VII, France* : « Geometry and function of the motor map in the superior colliculus ».

Benoît Girard, *Researcher at the Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR), UPMC/CNRS, France* : « Subcortical decisions: towards models of the tecto-basal loops for saccadic selection ».

Tony Prescott, *Professor of Cognitive Neuroscience at the University of Sheffield, UK* : « Control of "gaze" in the rat vibrissal system: insights from neuroethology and robotics ».

Stefano Ramat, *Associate professor of Biomedical Engineering at the University of Pavia, Italy* : « Saccades, models, membranes and patients: from behavior to the bench and back ».

Avec la participation de John Steeves, *Professor and BC Leadership Chair, ICORD* et de Antony J. Hodgson, *Associate Professor, Mechanical Engineering* (University of British Columbia) ; de Alexej Grantyn, *Researcher, Emeritus* (CNRS) ; de Vincent Hayward, *professor* (Institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR) UPMC-CNRS).

## SÉMINAIRES DU LABORATOIRE

**Divers**

Patricia Besson, post-doctorante, Institut des Sciences du Mouvement, Marseille : « *Modeling audiovisual perception using Bayesian networks and information theory* » (17 décembre).

Pr Guillemette Bolens, Professeur à l'Université de Genève (Suisse) : « *Les gestes et la perception du mouvement dans l'art et la littérature* » (18 mars).

Dr Enrico Chiovetto, Institut Italien de technologie : « *Triphasic muscle organization of whole-body reaching movements* » (25 janvier).

Kamran Diba, chercheur associé, Rutgers University (États-Unis) : « *Temporal Coordination of Neurons in Spatial Memory* » (12 janvier).

Pr Itzhak Fried, Professeur à l'Université de Los Angeles (États-Unis) et à Université de Tel-Aviv (Israël) : « *Matter and memory: stimulation and recordings in the human temporal lobe* » (4 février) ; « *Matter and memory: single neurons and human recollections* » (11 février) ; « *Neuronal mechanisms of will and action: stimulation and single neuron recordings in the human frontal lobe* » ; « *Surgery of epileptogenic and functional brain networks: plasticity and functional recovery* » (17 février).

Dr James R Lackner, Brandeis University, Waltham, Massachusetts : « *Perception of self-motion: implications for control of reaching movements* » (18 janvier).

Pr Jack Loomis, University of California, Santa Barbara - Department of Psychology Research Professor : « *Spatial updating: its functional properties, its localization using fMRI and its use in the measurement of perception* » (8 septembre 2010).

Pr Yoshihiko Nakamura, Professeur à l'Université de Tokyo (Japon) : « *Challenges in Humanoid Robotics* » (25 novembre) ; « *Toward Humanoid Robots Accumulating Human Behaviors* » (2 décembre) ; « *Toward Humanoid Robots Communicating with Humans* » (10 décembre) ; « *Toward Humanoid Robots Understanding Human Sensation* » (16 décembre).

Dr Michael Schaefer, Otto-von-Guerick Universität, Klinik für Neurologie, Magdeburg, Germany : « *Body in mind: From physical representation to social perception - about an area formerly known as the primary somatosensory cortex* » (8 janvier).

### Séminaires internes

Bérangère Thirioux, chercheur au LPPA : « *Fonder l'altérité: un dialogue entre phénoménologie et neurosciences* » (15 février).

Quang-Cuong Pham, doctorant au LPPA : « *Comment la synchronisation protège du bruit* » (8 mars).

Yonane Aushana, doctorant au LPPA : « *Étude des réponses auditives au niveau du cortex visuel des mammifères aveugles de naissance* » (6 avril).

Hideki Kadone, chercheur au LPPA : « *Autonomous classification and abstraction of motion patterns by an associative neural network model / Kinematic features in expression of emotion during locomotion / Gaze anticipation along complex curved path during locomotion* » (4 mai).

### Séminaires du CIRB

Adrien Peyrache, doctorant au LPPA : « *Sleep on it: large scale interaction in the brain 'offline' and its implications for learning and memory* » (8 janvier).

Jérôme Ribot, chercheur au LPPA : « *The different critical periods of the visual cortex in mammals assessed by optical imaging* » (7 mai).

## TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

### I. Équipe Mémoire spatiale et contrôle du mouvement (A. Berthoz)

#### 1.1. Navigation dans des espaces complexes à plusieurs niveaux

Équipe : A. Berthoz, M. Vidal, J. Droulez (LPPA), en coopération avec EDF, A. Pasqualotto, G. Thibault

Les recherches dans le domaine de la navigation concernent principalement les déplacements sur des surfaces simples 2D au cours desquels seule la rotation en lacet doit être intégrée. Dans cet axe de recherche, nous avons abordé l'étude des fonctions cognitives et sensorielles humaines face à des situations plus complexes, notamment lors de la navigation dans des structures 3D de type bâtiment à plusieurs étages. Ces travaux entrent dans la continuité de la thèse de M. Vidal.

Les études précédentes ayant abordé la navigation dans des environnements 3D ont trouvé que le mouvement dans la dimension verticale (d'un niveau à l'autre) introduit des déficits dans la représentation spatiale du bâtiment. Nous proposons

d'étendre les connaissances empiriques sur ce sujet qui est fondamental dans notre quotidien. En effet, nous passons une proportion considérable de notre vie urbaine dans des bâtiments à plusieurs niveaux. Nous commencerons par examiner les effets d'apprentissage avec des environnements 3D simples, afin d'entraîner les participants à différents types de routes pour tester si le problème que posent les déplacements dans des jonctions verticales (escaliers, ascenseurs, échelles) proviendrait du fait que les personnes explorent habituellement un nouvel environnement selon des trajectoires horizontales (dans le même étage). Ensuite, nous utiliserons des environnements plus complexes (avec une structure irrégulière) et avec des jonctions verticales indirectes pour découvrir quelles sont les stratégies les plus efficaces pour apprendre les environnements multi-niveaux.

### *1.2. Planification et contrôle de la locomotion visuellement guidée chez l'homme*

Équipe : D. Bernardin, H. Kadone, A. Berthoz (LPPA), en collaboration avec D. Bennequin (Université Paris VI) & T. Sugar (Arizona State University) (Projet européen ROBOSOM et projet ANR LOCANTHROPE)

Ce projet vise à examiner le guidage visuel de la locomotion et plus précisément la stratégie « top-down » de réorientation du regard et des segments corporels. Un grand nombre d'études ont constaté que, lorsqu'un humain marche en courbe, les yeux, la tête, le tronc, anticipent successivement le changement d'orientation du segment sous-jacent (Glasauer *et al.*, 2002 ; Grasso *et al.*, 1996, 1998b ; Hollands, 2002 ; Imai, 2001 ; Prevost *et al.*, 2002 ; Takei *et al.*, 1996, 1997). Le mécanisme anticipatoire permet en outre une stabilisation de la tête favorisant l'intégration des informations visuelles et vestibulaires d'un cadre de référence stable et cohérent (Pozzo *et al.*, 1990, 1991 ; Pozzo *et al.*, 1995 ; Berthoz, 1997). Ces constats nous amènent à nous interroger sur les déterminants du degré de rotation de chaque segment et sur leurs relations temporelles lors de la locomotion. Quelle est la nature des synergies primitives reliant la vision et les autres segments du corps ? Dans le cadre du projet européen RoboSoM, l'étude de la locomotion chez l'homme constitue une base neuroscientifique permettant de développer des robots humanoïdes possédant des capacités de perception et d'action. Dans cette optique, la relation entre le mouvement des yeux anticipatoires, la tête et les différents segments du corps est examinée dans un environnement visuel contraint impliquant différentes tâches telles que contourner ou éviter des obstacles et monter sur une marche.

### *1.3. Influence de l'action motrice sur une tâche de mémoire épisodique en réalité virtuelle*

Équipe : N. Jebara en co-direction avec A. Berthoz (LPPA) & P. Piolino (LPNCog) et avec M. Zaoui (LPPA). En coopération avec le LPNCog (Université Descartes Paris V), J. Barra, E. Orriols, G. Plancher & P. Piolino (projet ANR SCORE)

La mémoire épisodique est la mémoire des événements personnellement vécus dans un contexte spatio-temporel donné. Cette mémoire peut être évaluée dans des conditions proches de la vie réelle grâce à la technique de la réalité virtuelle.

Les résultats des recherches sont controversés sur le rôle bénéfique de l'action sur la mémoire épisodique (Plancher *et al.*, 2008). L'action est en effet un processus complexe qui peut être décomposé en deux facteurs : un *contrôle de la vitesse* (le sujet agit dans l'environnement en adaptant sa vitesse à l'exploration et à ses capacités cognitives d'explorations) et un *contrôle de la direction* (le sujet décide de l'itinéraire). Nous décomposerons donc l'action non seulement selon le contrôle de la vitesse et le contrôle de la direction, mais également en graduant la difficulté motrice pour le contrôle de la vitesse (d'une condition nécessitant peu de ressources cognitives vers une condition nécessitant davantage de ressources). L'étude a pour objectif d'évaluer chez des sujets sains l'influence de ces variables sur les performances aux différentes composantes de la mémoire épisodique (le « factuel », les « détails », le « spatial », le « temporel », le « *binding* »). Nous faisons tout d'abord l'hypothèse selon laquelle les sujets qui auront la possibilité de choisir l'itinéraire devraient avoir une représentation spatiale plus précise que les sujets qui sont contraints dans le choix de l'itinéraire. En effet, le contrôle de la direction requiert de se projeter soi-même dans l'action et représente une intention d'interagir avec l'environnement (Berthoz, 2003). De la même façon, on suppose qu'un avantage du contrôle de la vitesse sur les performances en mémoire devrait être observé uniquement dans la conduite facilitée qui nécessite moins de ressources attentionnelles et de façon plus marquée sur la composante visuo-spatiale, en accord avec les données de Brooks et collaborateurs (1999).

#### 1.4. Bases neurales de l'empathie

Équipe : B. Thirioux & A. Berthoz (LPPA) ; avec les Drs. Tandonnet et Jaafari (SHU Henri Laborit, Poitiers) ; avec le Dr. Jerbi (Dynamique cérébrale et cognition ; INSERM U821)

Dans une première étude comportementale, nous appliquons notre modèle d'empathie (symétrie par rotation et translocation du point de vue égocentré) et sympathie (symétrie par réflexion et conservation du point de vue égocentré ; Thirioux *et al.*, 2009 ; Thirioux & Berthoz, 2010 ; voir aussi Berthoz, 2004) à une population de patients schizophrènes ( $n = 15$ ). À partir de nos résultats comportementaux (Thirioux *et al.*, 2009) en électroencéphalographie de surface (EEG ; Thirioux *et al.*, 2010, Thirioux *et al.* en prép.) et intracrâniale (iEEG ; Thirioux *et al.*, en prép. ; en collaboration avec le Dr. Seeck) montrant une activation spécifique du gyrus frontal inférieur droit (IFG) et de l'hippocampe droit lors de la translocation spontanée du point de vue égocentré (empathie) et à partir de résultats issus de la littérature montrant un trouble de « l'intégration fonctionnelle » entre l'hippocampe droit et l'IFG droit chez les patients schizophrènes (Benetti *et al.*, 2009), nous testons si les capacités empathiques et l'utilisation de référentiels spatiaux sont ou non défaillants chez les patients lors de l'interaction spontanée avec autrui.

Dans une deuxième étude, nous analysons les temps fréquences de nos données EEG et iEEG afin de compléter nos analyses des potentiels évoqués (Thirioux *et al.*, 2010 ; Thirioux *et al.*, en prép.). Nous nous concentrons sur l'activation et la

suppression de l'Alpha (EEG) entre 300 et 400 ms après l'apparition du stimulus au niveau des lobules pariétaux supérieurs et du Gamma entre 250-400 ms dans les amygdales et hippocampes droits et gauches (iEEG).

Enfin, dans une troisième étude en collaboration avec le Pr. De Gelder (Tilburg) et utilisant l'EEG chez des sujets sains en salle immersive, nous testons l'influence d'un fond dynamique (vidéos de scènes de foules) montrant une expression de joie, de peur ou neutre sur la perception d'un corps statique (images) exprimant soit la joie, la peur ou une expression neutre. Nous faisons l'hypothèse que l'expression émotionnelle du corps cohérente avec celle du fond dynamique (joie/joie) est traitée plus rapidement à des latences précoces (100-180 ms) en comparaison de la non-cohérence émotionnelle entre le fond et l'image (joie/peur).

### *1.5. Modélisation des capteurs vestibulaires*

Projet Européen CLONS, avec l'Université de Pise, S. Micera

Équipe : A. Berthoz, M. Dimiccoli (LPPA), D. Bennequin (Paris Diderot University) & B. Girard (ISIR, UPMC/CNRS)

Le projet consiste à développer un modèle mathématique des organes otolithiques (sacculle et utricule), qui donne une explication fonctionnelle nouvelle de leur structure géométrique. Le modèle proposé se base sur l'hypothèse selon laquelle la striola, une courbe qui, approximativement, croise la macula chez tous les mammifères, joue un rôle crucial dans la détection des changements de directions lors d'accélération linéaires. Il a été démontré que la détection est optimale lorsque les courbes mathématiques représentant la striola sont courbées et tordues et lorsque ces courbes se trouvent sur la surface d'une sphère tridimensionnelle. Le modèle qui en découle prédit un ensemble d'accélération détectées de façon optimale pour l'utricule et le sacculle et, également, les accélérations non détectées. Cet ensemble est présenté comme correspondant aux accélérations mises en œuvre par les êtres humains, dans des conditions naturelles. Les résultats seront présentés aux Rencontres annuelles de la Société de neurosciences, à San Diego, du 13 au 17 novembre 2010. Actuellement, cette équipe travaille sur la réponse à un stimulus dynamique. Les résultats de cette analyse seront inclus dans un article de journal qui est en cours de préparation.

### *1.6. Dynamique des stratégies spatiales de navigation*

Équipe : E. Dupierrix, A. Berthoz, M. Zaoui (LPPA) (Projet MATISS Pôle de compétitivité, en coopération avec Renault)

La capacité de se déplacer efficacement dans un environnement repose sur la mise en jeu de plusieurs stratégies et mémoires spatiales (Avraamides & Kelly, 2008). Cette interaction complexe des processus de navigation est l'objet de nos recherches. Elle est étudiée à plusieurs niveaux.

Dans une première série de recherches, nous avons étudié la dynamique d'interaction des référentiels spatiaux en mémoire. De nombreux résultats issus des

travaux chez l'homme et l'animal défendent l'idée selon laquelle différents cadres de référence peuvent être utilisés pour coder l'environnement qui nous entoure. Au moins deux cadres de références seraient mobilisés lors de la navigation : (1) un référentiel égocentré (centré sur soi) qui permet de construire l'environnement par rapport à notre position dans l'espace et (2) un référentiel allocentré (centré sur le monde) permettant de construire l'espace indépendamment de notre position (Berthoz, 1991 ; Burgess, 2006 ; Nadel & Hardt, 2004). Bien que les études récentes aient argumenté en faveur de l'encodage simultané de l'espace en coordonnées égocentriques et allocentriques et aient montré que l'homme était capable d'alterner entre ces deux types de connaissances spatiales, la flexibilité du système cognitif pour passer de l'une à l'autre reste peu documentée. Nous avons abordé cette question en examinant le coût temporel lié au changement de référentiels spatiaux en mémoire. La procédure expérimentale prévoyait deux sessions : (1) une première phase de navigation dans une ville virtuelle au cours de laquelle les participants devaient apprendre la localisation de lieux citadins (par exemple des magasins, la poste) et (2) un test de mémoire spatiale impliquant des connaissances spatiales égocentrées et allocentrées de ces différents lieux. Les résultats ont mis en évidence une importante latence temporelle liée au changement de référentiel (en moyenne 585 ms) révélant une flexibilité limitée du système cognitif à changer de codage spatial en mémoire.

Une seconde série d'expérimentation est menée afin d'étudier la nature de nos constructions spatiales allocentrées parfois appelées « cartes cognitives ». La question que nous posons concerne la formation de ces connaissances spatiales et leur dépendance vis-à-vis du contexte sensori-moteur d'apprentissage. Il s'agit d'établir si la mémoire allocentrée est strictement sémantique, c'est-à-dire totalement dépourvue d'informations épisodiques liées au contexte d'apprentissage. Cette opération de recherche est actuellement en cours de préparation.

Le troisième axe de recherche concerne les processus de prise de décision au cours de la navigation. Se déplacer dans un environnement complexe implique à tout moment de prendre des décisions concernant le chemin à prendre étant donné notre état de connaissance de l'environnement, les indices visuels présents ainsi que nos buts. Prendre une décision dans un environnement incertain crée un conflit entre deux besoins opposés : collecter de l'information sur l'environnement et exploiter cette connaissance pour optimiser les décisions. À notre connaissance, ces décisions d'exploration et d'exploitation n'ont jamais été étudiées dans le domaine de la navigation spatiale. L'objectif de nos recherches est de comparer les corrélats neuro-anatomiques et fonctionnels de ces deux types de stratégies (exploration/exploitation) dans une tâche de navigation avec incertitude. L'activité électro-encéphalographique (EEG) sera enregistrée chez des adultes sains alors qu'ils se déplacent dans un environnement virtuel complexe inconnu.

## **II. Équipe Approche probabiliste et perception active (J. Droulez)**

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. Nous développons également des modèles quantitatifs de la perception active suivant une approche bayésienne. Nous essayons également de proposer des mécanismes biologiquement plausibles permettant l'implémentation des calculs probabilistes. Enfin, nous proposons et nous évaluons différentes méthodes de restitution visuelle d'environnements ou de simulations de phénomènes physiques complexes.

### *2.1. Perception visuelle des objets et du mouvement*

Équipe : A. Conninx, C. Boucheny, G. Thibault & J. Droulez (LPPA en coopération avec EDF)

La thèse de Christian Boucheny (soutenue le 13 février 2009), codirigée avec Georges-Pierre Bonneau, sous contrat Cifre EDF avait pour objectif l'étude psychophysique des méthodes de visualisation scientifique, notamment les techniques de rendu volumique et de restitution cinématique. Christian Boucheny 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. Il a également développé un nouvel algorithme de restitution des ombrages (Eye-Dome Lighting) et des tests comparatifs ont été effectués pour deux tâches perceptives : la perception de l'orientation 3D de lignes de champs et la détection de connexité de tuyauteries représentées sous forme de nuage de points.

### *2.2. Prior et conditionnement perceptif*

Équipe : J. Droulez (LPPA) en collaboration avec P. Bessière (CNRS, Grenoble)

Le raisonnement probabiliste est fondé sur l'application de deux règles générales : la règle multiplicative (ou règle de Bayes) qui détermine la probabilité conjointe à partir du produit de probabilités conditionnelles et la règle additive (ou règle de marginalisation) qui détermine la distribution de probabilité sur un sous-ensemble de variables à partir de la probabilité conjointe. Cette deuxième règle n'avait pour l'instant fait l'objet d'aucune étude expérimentale. Dans ce travail, nous avons étudié le conditionnement des biais perceptifs de perception du mouvement par des combinaisons de deux indices de couleurs. Nous avons montré que les sujets après conditionnement présentaient encore un biais perceptif lorsque l'un des indices ou les deux étaient absents. Nous avons confirmé ces résultats avec une deuxième étude où les mouvements oculaires étaient contrôlés. Enfin, nous avons développé et comparé plusieurs modèles permettant d'expliquer les biais perceptifs. Les modèles incluant la règle de marginalisation ont aussi systématiquement prédit les résultats expérimentaux que les modèles n'incluant pas cette règle.

### 2.3. *Implémentation des calculs probabilistes par les interactions biochimiques*

Équipe : J. Droulez, A. Houillon (LPPA) en coopération avec P. Bessière (CNRS, Grenoble)

Les modèles bayésiens sont particulièrement efficaces pour rendre compte du comportement et de la perception face à des situations incertaines et des stimuli ambigus. Ces modèles supposent que le cerveau est capable de représenter des distributions de probabilités sur des variables pertinentes (forme, mouvement, position, etc.) et d'effectuer des calculs probabilistes sur ces distributions. Une question ouverte est donc de comprendre par quels mécanismes et à quel niveau les probabilités sont codées et manipulées. En collaboration avec Pierre Bessière, nous explorons l'idée selon laquelle les réseaux biochimiques complexes de la signalisation cellulaire sont capables d'effectuer ces tâches computationnelles. Dans le cadre de sa thèse, Audrey Houillon développe cette idée en l'appliquant au fonctionnement des cellules sensorielles (photorécepteurs, neurones olfactifs, cellules ciliées de l'oreille interne), et plus particulièrement à la chaîne de réactions biochimiques de la transduction et au rôle joué par le calcium intracellulaire dans l'adaptation rapide.

### 2.4. *Visualisation scientifique : représentation multi-physique et probabiliste de phénomènes physiques complexes*

Équipe : A. Coninx, G. Thibault, J. Droulez (LPPA en collaboration avec EDF) et G.P. Bonneau (Université Joseph Fourier, Grenoble I)

Les outils de simulation numérique sont largement utilisés par la communauté scientifique pour prévoir le comportement d'un système physique. Les calculs de plus en plus poussés génèrent de grandes quantités d'informations et une évaluation de l'incertitude sur les valeurs obtenues, qu'il faut ensuite pouvoir visualiser. La visualisation scientifique doit être guidée par les capacités de perception de l'utilisateur final afin de lui présenter toutes les informations dont il a besoin, et seulement ces informations. En outre, la compréhension et l'interprétation sont fortement liées à la capacité d'interagir avec le processus de visualisation. La thèse d'Alexandre Coninx, qu'il a commencée en 2009 avec le soutien d'EDF et avec la collaboration de G.P. Bonneau (Université Joseph Fourier, Grenoble) vise à proposer et à évaluer perceptivement de nouvelles méthodes permettant d'explorer visuellement les résultats de calcul pour y déceler les formes du phénomène étudié. Cette thèse s'intéressera particulièrement aux problématiques spécifiques posées par la visualisation de l'incertitude dans le contexte de modèles multiphysiques.

### 2.5. *Fusion probabiliste d'images et de données tridimensionnelles*

Équipe : Th. Chaperon (Trimble), G. Thibault, J. Droulez (LPPA en coopération avec EDF)

De nouveaux outils probabilistes ont été développés pour la calibration et l'estimation de la pose de caméra ainsi que 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). Ces algorithmes ont été récemment étendus pour prendre en compte des données *a priori* sur le centrage optique et la focale de la caméra, ainsi que les distorsions optiques radiales.

### 2.6. *Analyse comparative de la géométrie des canaux semi-circulaires*

Équipe : J. Droulez, A. Berthoz, D. Bennequin en coopération avec R. David, R. Allain, Ph. Janvier (Muséum d'histoire naturelle), collaboration LPPA-UMR7207-UMR7586

Nous avons développé une nouvelle analyse de la géométrie des canaux semi-circulaires basée sur la reconstruction des lignes de flux centrales. Cette méthode est applicable à différents types de données acquises sur des espèces fossiles ou vivantes et ouvre la voie à une comparaison interspécifique morphologique et fonctionnelle précise. Ce travail est fait dans le cadre de la thèse de R. David sur l'évolution des capteurs vestibulaires chez les dinosaures et les oiseaux. L'hypothèse centrale de cette thèse a été proposée par A. Berthoz. Elle suppose qu'un facteur important dans le passage des dinosaures aux oiseaux a été le développement d'un appareil vestibulaire capable de mesurer des mouvements en 3D libérant les oiseaux du besoin d'avoir un référentiel stable sur la terre.

### 2.7. *Approche probabiliste et perception active*

Équipe : M. Vidal, V. Barrès et J. Droulez (LPPA)

Lors de la rivalité binoculaire, deux images différentes présentées dans chaque œil donneront lieu à une compétition entre un percept et l'autre avec des alternances compulsives. Ce projet vise à déterminer la localisation de ces oscillations perceptives en étudiant les interactions réciproques entre l'audition et la vision en situation de perception multimodale robuste. Les expériences reposent sur l'effet McGurk qui consiste à percevoir /ada/ lorsqu'un mouvement de lèvres correspondant à /aga/ et le son /aba/ sont présentés simultanément. Si l'audition contribue dans la résolution de la compétition visuelle et vice-versa, nous pourrions formuler l'hypothèse que le mécanisme de décision perceptive sous-jacent à la conscience phénoménale concerne le maintien et la suppression de *patterns* multisensoriels complexes plutôt que ses composantes unimodales. Une série d'expériences a été réalisée afin de mettre en évidence les caractéristiques suivantes : 1) la possibilité de faire rivaliser deux vidéos pour les mouvements de lèvres et un contrôle volitional (maintenir autant que possible un percept visuel) significatif pour ceux qui sont sujets à l'effet McGurk (lecture sur lèvres possible) ; 2) l'existence d'environ 20 % de cas d'intégration avec le percept supprimé lorsqu'il est présenté dans l'œil dominant ; 3) une augmentation de l'effet volitional en présence d'un son pour ceux sujets à l'effet McGurk, bien que la congruence sensorielle à bas niveau soit nécessaire (/aba/ vu et entendu).

### III. Équipe développement perceptif et intégration interhémisphérique (Ch. Milleret)

#### 3.1. Étude par imagerie optique des caractéristiques spatio-temporelles de la carte corticale neuronale définie par les terminaisons calleuses au niveau du cortex visuel primaire du mammifère adulte

Équipe : A. Papandréou, J. Ribot, Y. Aushana, L. Foubert, A. Grantyn, C. Milleret (LPPA)

Le corps calleux (CC) transfère des informations visuelles d'un hémisphère à l'autre chez le mammifère. Afin de mieux identifier les bases neurales de la perception visuelle, nous avons caractérisé ici ce dialogue inter-hémisphérique en étudiant les réponses neuronales évoquées par l'activation des terminaisons calleuses dans le cortex visuel primaire d'un mammifère adulte. La technique d'imagerie optique voltage dépendante (OI-VSD) a été utilisée afin de caractériser fonctionnellement les cartes corticales neuronales définies par ces terminaisons, dans les domaines spatiaux ET temporels (résolutions : 15  $\mu\text{m}$  ; 2 ms). D'un point de vue spatial, nous avons confirmé nos données antérieures obtenues en enregistrant les signaux intrinsèques corticaux (Rochefort *et al.*, 2007) : 1) l'existence de cartes fonctionnelles transcalleuses matérialisées par des « *patches* » d'activité surtout localisés au niveau de la zone de transition entre les aires A17 et A18 (TZ) ; 2) le fait que ces « *patches* » sont surtout localisés dans TZ côté A18 lorsque les stimuli visuels sont des basses fréquences spatiales (BFS) alors qu'ils sont surtout localisés dans TZ côté A17 avec des hautes fréquences spatiales (HFS). Ceci signifie que la carte transcalleuse dans TZ est composée *a minima* de deux zones codant pour des fréquences spatiales différentes qui évoluent en parallèle suivant l'axe antéro-postérieur du cortex. Avec la technique OI-VSD, nous avons de plus montré que les BFS sont deux fois plus efficaces pour activer TZ *via* le CC que les HFS. L'analyse temporelle de ces mêmes cartes a permis en outre de démontrer que les BFS activent TZ deux fois plus rapidement que les HFS. Fonctionnellement, ces résultats indiquent que le CC véhicule des informations concernant les différents attributs de la scène visuelle suivant une séquence temporelle précise, participant ainsi « en propre » à l'élaboration de la perception.

#### 3.2. Étude par enregistrements multi-électrodes et reverse corrélation des caractéristiques fonctionnelles des cellules du cortex visuel primaire activées *via* le corps calleux

Équipe : C. Milleret (LPPA) en collaboration avec Y. Asada et I. Ohzawa, université d'Osaka, GCOE program (Japon)

Les cellules du cortex visuel primaire activées par le corps calleux chez le mammifère supérieur le sont en général également *via* la voie rétinogéniculocorticale. Depuis les années 60 du siècle précédant jusqu'à récemment, il a été considéré que les informations transmises par l'une et l'autre voie étaient identiques.

Toutefois, certaines de nos données récentes, obtenues par enregistrements multi-électrodes et analyse très précise des réponses visuelles de ces cellules par corrélation inverse démontrent le contraire. Nous sommes en effet en train de démontrer au contraire que l'une et l'autre voie transfèrent des informations différentes mais complémentaires. Ceci concerne le codage de la sélectivité pour l'orientation et les fréquences spatiales, le codage du mouvement mais également le codage temporel. En fait, cette différence est systématique quelle que soit la propriété considérée. D'un point de vue fonctionnel, ceci signifie que la voie transcalléuse et la voie rétino-géniculocorticale participent non pas de façon similaire mais de façon complémentaire à l'élaboration de la perception visuelle.

### *3.3. Étude par imagerie optique de la réorganisation des cartes d'orientation après adaptation au niveau du cortex visuel du mammifère adulte*

Équipe : C. Milleret (LPPA) en collaboration avec A. Vossoughi, S. Shumikhina et S. Molotchnikoff, université de Montréal (Canada)

Entre autres propriétés, chaque neurone du cortex visuel primaire de mammifère est activable par une orientation donnée du stimulus visuel. On dit qu'il est « sélectif pour l'orientation ». Chez les mammifères supérieurs, ces neurones codant pour une même orientation sont regroupés en colonnes traversant verticalement toute l'épaisseur du cortex visuel. Les neurones codant pour des orientations proches forment en outre des colonnes proximales, il y a une sorte de *continuum* dans le codage de l'orientation au niveau de ce cortex. Avec la technique d'imagerie optique, on peut visualiser le sommet de ces colonnes à la surface du cortex visuel, lesquelles forment les « cartes d'orientation ». Alors que ces cartes d'orientation sont considérées comme très stables chez le mammifère adulte, nous démontrons ici, en enregistrant les signaux intrinsèques corticaux par imagerie optique, qu'elles sont au contraire très malléables. En effet, nous montrons que la présentation d'une orientation donnée pendant 12 min est suffisante pour engendrer une réorganisation très importante des ces cartes d'orientation. Le cortex visuel « en développement » n'est donc pas le seul à pouvoir se réorganiser. Avec ces résultats, nous démontrons en effet que le cortex visuel adulte est capable d'« adaptation ». Ces résultats sont très encourageants pour l'avenir puisqu'ils indiquent que les effets de la malvoyance peuvent être limités quelque soit l'âge.

### *3.4. Étude par imagerie optique de la complétude dans le cortex visuel primaire : le cas de la direction et de la dominance oculaire*

Équipe : J. Ribot, C. Milleret (LPPA) en collaboration avec T. Shigeru, Laboratory for Visual Neurocomputing, RIKEN BSI, Japan

Les neurones du cortex visuel primaire sont sélectifs localement par rapport aux attributs de la scène visuelle. Ils sont par conséquent sensibles à l'orientation d'un stimulus, à sa direction ou encore à l'œil auquel ce stimulus est présenté. Certains modèles du cortex visuel primaire reposent sur le fait que, pour chaque point de

la scène visuelle, un nombre égal de détecteurs pour chaque attribut est mis en jeu. Cette notion de « complétude », bien qu'élégante, n'a cependant jamais été prouvée directement. Nous nous sommes intéressés à ce problème en examinant le cas de la direction et de la dominance oculaire. Pour cela, nous avons utilisé l'imagerie optique intrinsèque qui permet d'estimer la représentation des différents attributs sur une grande surface corticale. Nos résultats montrent que, dans une région représentant la partie basse du champ visuel, les directions ne sont pas représentées de façon égale : les directions parallèles au flux optique induit par le mouvement de soi en avant sont surreprésentées. Les directions perpendiculaires sont elles aussi surreprésentées, mais seulement au niveau des domaines de faible sélectivité par rapport à la direction et pour l'œil controlatéral. Nos résultats montrent donc que la notion de complétude n'est pas respectée, et suggèrent que le cortex visuel primaire favorise la surreprésentation de certaines combinaisons de propriétés neuronales pour la perception du flux optique.

*3.5. Démonstration par double marquage et reconstruction 3D axonale de projections directes des neurones inhibiteurs du réseau prémoteur sous-tendant la génération des saccades oculaires sur les neurones rétino-spinaux*

Équipe : A. Grantyn, B. Kuze, A.M. Brandi, M.A. Thomas, N. Quenech'du (LPPA)

Les neurones inhibiteurs du réseau prémoteur sous-tendant la génération des saccades oculaires sont appelés « Omnipause neurons » (OPNs). Pendant les périodes de fixation du regard, ils génèrent une décharge continue qui s'arrête (pause) juste avant et pendant une saccade. Cet arrêt enlève l'inhibition tonique exercée sur les neurones phasiques du générateur saccadique qui, à leur tour, excitent, par leurs projections directes, les motoneurons des muscles extraoculaires. Une pause dans la décharge des OPN est indispensable pour produire une saccade. Historiquement, cette fonction des OPNs a été clarifiée par des expériences effectuées sur des animaux dans la condition « tête fixe ». Cependant, dans les conditions naturelles, les déplacements rapides du regard sont effectués non seulement par des mouvements saccadiques des yeux mais aussi par les mouvements synergiques de la tête et éventuellement du corps. La question de savoir si les OPN exercent un contrôle sur d'autres effecteurs que les yeux n'est pas résolue car des enregistrements de l'activité des OPNs dans la condition « tête libre » ont donné les résultats controversés. En ce qui concerne les études anatomiques, elles ont démontré l'existence de terminaisons synaptiques des OPNs en dehors des sites qui abritent les neurones excitateurs du générateur saccadique mais la nature des neurones contactés dans des régions « non-saccadiques » n'a pas été clarifiée. Nous avons donc exploré la possibilité selon laquelle les OPN forment des contacts avec des neurones reticulo-spinaux (RSNs) suivant la logique que la présence de tels contacts serait un argument en faveur de leur contribution au contrôle de plusieurs effecteurs participant aux mouvements du regard.

Pour identifier les RSNs dans la région ponto-bulbaire, nous avons utilisé chez l'animal le transport rétrograde de WGA-HRP injecté par pression au niveau des

segments cervicaux (C2-C3) de la moelle épinière. Trois jours plus tard, un marqueur antérograde (biocytine) a été appliqué par iontophorèse dans la région médiane du pont, où se trouvent les OPNs. Pour assurer le marquage des OPNs, les pipettes remplies de biocytine ont été utilisées pour enregistrer les décharges caractéristiques des OPNs pendant des saccades oculaires, l'expérience étant menée sur animal vigile. La révélation des marqueurs comportait deux procédés, l'un spécifique de la HRP, l'autre de la biocytine, ce qui permettait de distinguer facilement les RSNs et OPNs. La reconstruction des branchements axonaux des OPNs a été effectuée à l'aide du logiciel NeuroLucida. Nous avons retenu pour l'analyse quantitative cinq neurones dont le marquage des fibres préterminales et des boutons synaptiques était complet.

Chacun de ces neurones formait des appositions de boutons synaptiques sur les corps cellulaires et les dendrites proximaux de 3–13 RSNs. Ainsi, nous avons constaté une large variation entre les OPNs en ce qui concerne la probabilité de contacter les RSNs. Ceci est mis en évidence aussi par la fraction des terminaisons allouée aux RSNs par les OPNs individuels (1,6 – 44,2 %). Le nombre moyen des boutons assignés à chaque RSN variait entre 5,7 et 23,6, ce qui correspond à la gamme de l'intensité anatomique de la connexion observée précédemment sur d'autres neurones inhibiteurs du tronc cérébral et de la moelle épinière chez la même espèce. Le type fonctionnel des RSNs contactés par les OPNs reste inconnu. L'hypothèse la plus probable est que ce sont les neurones contrôlant les motoneurones des muscles de la nuque. Mais nous ne pouvons pas exclure le marquage par WGA-HRP des neurones descendant au-delà des segments cervicaux supérieurs, vers les motoneurones des muscles du dos et des extrémités, eux aussi contribuant à la réorientation du regard. Sur le plan plus général, notre étude démontre pour la première fois que la fonction des OPNs n'est pas limitée au contrôle des saccades oculaires et qu'elle est plus généralisée, assurant ainsi la synchronisation d'une multitude de groupes musculaires agissant en synergie.

### 3.6. *Contrôle postural et strabisme*

Équipe : A. Legrand, J. Ribot, N. Lebas, C. Milleret (LPPA) en collaboration avec M.P. Bucci, lab. de Psychologie et neuropsychologie cognitives, Institut de psychologie, université Paris Descartes ; E. Bui Quoc, service d'ophtalmologie de l'Hôpital Robert Debré ; S. Wiener-Vacher, service ORL de l'Hôpital Robert Debré

L'objectif de cette étude était d'examiner le contrôle postural chez l'enfant présentant un déficit de l'entrée visuelle : le strabisme. La stabilité posturale a été étudiée avant et après chirurgie de leur strabisme afin de mettre en évidence les effets de celui-ci sur la posture. L'équilibre postural résulte de l'association de plusieurs entrées sensorielles : visuelles, vestibulaires et proprioceptives. L'apparition d'une perturbation de l'entrée visuelle entraîne donc une réadaptation posturale, qui implique sans doute une compensation par les autres entrées sensorielles. Dix enfants strabiques, âgés de 4 à 9 ans, ont été examinés ici : sept enfants présentaient une ésoptropie et trois une exotropie. Des examens ophtalmologiques, orthoptiques,

vestibulaires et posturaux ont été réalisés en pré-opératoire et en post-opératoire (délais : 2 semaines et 2 mois). Le bilan postural a été enregistré avec une plateforme de force Technoconcept, sous deux conditions visuelles : « yeux ouverts » (YO) et « yeux fermés » (YF). Les paramètres retenus ont été la surface du centre de pression (CdP), la variance de vitesse du CdP et l'analyse des fréquences d'oscillations corporelles par la transformée de Fourier. La stimulation visuelle utilisée a été l'une des composantes suivantes du flux optique visuel : contraction, expansion, translation droite et gauche. Contrairement à l'enfant sain, les résultats pré-opératoires n'ont pas montré de différences significatives de la surface du CdP et de la variance de vitesse du CdP entre les conditions YO et YE selon les quatre stimulations. Nous avons observé aussi que l'énergie dépensée dans la direction antéro-postérieure était plus importante que celle dépensée dans la direction médio-latérale. La chirurgie a réduit significativement l'angle de déviation pour les six enfants examinés. La comparaison du contrôle postural avant et 2 semaines après la chirurgie souligne toutefois une tendance à une augmentation de la variance de vitesse du CdP en post-opératoire. Les hautes fréquences d'oscillations corporelles tendaient aussi à être plus élevée en post-opératoire. Ces résultats suggèrent que les enfants avec un strabisme sont moins visuo-dépendants que les enfants sains. Ils suggèrent également que la chirurgie a sans doute un effet immédiat sur la proprioception des muscles extra-oculaires, qui devrait toutefois se corriger avec le temps.

#### **IV. Équipe Bases neurales de la mémoire spatiale et navigation (S. Wiener)**

*Étude de la relation entre l'activité des neurones individuels et les événements et les oscillations des potentiels de champs locaux (PCL) au rythme thêta*  
(Benchenane et coll., Neuron, 2010)

Équipe : K. Benchenane, G. Girardeau, A. Peyrache, M. B. Zugaro, S.I. Wiener (LPPA) en collaboration avec M. Khamassi (LPPA, UPMC), F. Battaglia (LPPA, université libre Amsterdam), Yves Gioanni et Patrick Tierney (U667, Collège de France)

En 1989, Buzsaki a proposé un modèle de consolidation mnésique en deux étapes. Pendant l'apprentissage, le rat encode les informations, période durant laquelle des oscillations à 5 à 10 Hz sont observées dans l'hippocampe. Ces informations seront rejouées pendant le sommeil durant des oscillations à haute fréquence (200 Hz) observées dans l'hippocampe et appelées *ripples*, aboutissant à leur consolidation puis à leur transfert vers des structures corticales. Les réactivations ont été observées dans l'hippocampe comme l'avait prédit le modèle (Lee & Wilson, 2002 ; Foster & Wilson, 2006). Cependant, bien que des données suggèrent que la réactivation au moment des *ripples* pourrait être importante dans l'apprentissage, aucune étude n'a jusqu'à présent établi de relation de cause à effet entre *ripples* et apprentissage. De plus, il reste à détailler la façon dont les informations importantes sont sélectionnées pendant l'acquisition pour être réactivées pendant le sommeil et transférées dans la mémoire à long terme.

Pour étudier le mécanisme permettant de sélectionner les informations qui seront réactivées dans le sommeil, nous nous sommes focalisé sur la voie hippocampo-préfrontal. En effet, la plupart des processus-clés du modèle ont été observés dans cette voie anatomique. Premièrement, l'hippocampe envoie des projections monosynaptiques vers le cortex pré-frontal (CPF) (Thierry *et al.*, 2000). Deuxièmement, lors d'un apprentissage spatial, il a été montré que l'hippocampe était activé précocement dans l'apprentissage mais n'était plus nécessaire tardivement alors que le profil inverse était observé dans le CPF, suggérant un transfert d'information de l'hippocampe vers le CPF (Maviel *et al.*, 2007). De plus, des oscillations *thêta* ont été observées dans les deux structures, ces oscillations pouvant être cohérentes ou non selon la tâche comportementale (Jones & Wilson, 2005).

Nous avons donc réalisé un apprentissage dans un labyrinthe en Y, dans lequel le rat devait apprendre successivement la règle « aller à droite » puis la règle « aller à gauche ». Une forte cohérence entre l'hippocampe et le CPF dans la bande *thêta* (Coh $\theta$ -HPC-CPF) était détectée au point de décision dans le labyrinthe en Y, après l'acquisition de la règle, c'est-à-dire quand la prédiction de récompense est forte. Nous avons ensuite regardé les modifications du réseau neuronal du CPF induites par la Coh $\theta$ -HPC-CPF. Certains neurones du CPF ont tendance à se synchroniser, se regroupant ainsi en assemblées cellulaires. Pendant les périodes de forte cohérence, ces assemblées sont fortement modulées par *thêta* et leurs phases préférées se concentrent autour du creux de *thêta*. Or des assemblées neuronales ont déjà été observées dans l'hippocampe (Harris *et al.*, 2003), déchargeant également dans le creux de *thêta* enregistré dans l'hippocampe. Durant ces périodes de forte cohérence, les *thêta* de l'hippocampe et du CPF oscillent de façon cohérente, ce qui signifie que les assemblées neuronales des deux structures se synchronisent avec un délai temporel compatible avec un renforcement par STDP. Nous avons donc regardé si ces assemblées neuronales se réactivaient pendant le sommeil et plus précisément pendant les *ripples* hippocampiques. Effectivement, les assemblées neuronales du CPF formées pendant les périodes de forte cohérence déchargent également pendant le sommeil des rats (au moment des *ripples*), et ce significativement plus dans le sommeil après la tâche comportementale que dans le sommeil précédant la tâche. Ceci suggère que les connections synaptiques entre les assemblées neuronales ont bien été renforcées.

Nos collègues de l'unité INSERM U 667 au Collège de France ont également enregistré des neurones pyramidaux et interneurons préfrontaux en même temps que les PCL au sein de l'hippocampe et du CPFm, mais chez l'animal sous anesthésie. Des injections de dopamine dans le CPFm provoquent une augmentation de cohérence des oscillations *thêta* de l'hippocampe et du CPFm et un changement de phase des neurones pyramidaux, mais non des interneurons. Les changements de circuits locaux fonctionnels observés lors de l'apprentissage pourraient donc bien être liés à l'activité de la dopamine.

En conclusion, nous montrons que lorsque le rat résout la tâche comportementale, les rythmes *thêta* de l'hippocampe et du CPF deviennent cohérents au point de décision, entraînant une synchronisation des assemblées neuronales des deux

structures. Ces assemblées sont ensuite réactivées pendant le sommeil suggérant que ces informations seront à terme stockées dans la mémoire à long terme. Selon notre hypothèse, il faut donc à la fois une forte cohérence mais également une forte certitude pour que les assemblées neuronales se synchronisent. Ce mécanisme permettrait de ne stocker dans la mémoire à long terme que les informations importantes, c'est-à-dire uniquement quand la prédiction de récompense est forte.

## PUBLICATIONS

### Responsable : Alain Berthoz

#### Reuves à comité de lecture

##### 2010

Berthoz A. et Thirioux B., « A spatial and perspective change theory of the difference between sympathy and empathy », *Paragrana*, 19(1), 2010, Akademik Verlag, 32-61.

Bullens J., Iglói K., Berthoz A., Postma A., Rondi-Reig L., « Developmental time course of the acquisition of sequential egocentric and allocentric navigation strategies », *J. Exp. Child. Psychol.*, 107(3), 2010 Nov, 337-50.

Capelli A., Berthoz A., Vidal M., « Estimating the time-to-passage of visual self-motion: Is the second order motion information processed? », *Vision Res.*, 50(9), 2010 Apr. 21, 914-23.

Dupierrix E. and Berthoz A., « Switching between egocentric and allocentric frames in memory », *J. Exp. Psychology: Learning, Memory and Cognition* (en révision), 2010.

Galati G., Pelle G., Berthoz A., Committeri G., « Multiple reference frames used by the human brain for spatial perception and memory », *Exp. Brain Res.*, 206(2), 2010 Oct, 109-20.

Iglói K., Doeller C.F., Berthoz A., Rondi-Reig L., Burgess N., « Lateralized human hippocampal activity predicts navigation based on sequence or place memory », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107(32), 2010 Aug. 10, 14466-71.

Landgraf S., Krebs M.O., Olié J.P., Committeri G., van der Meer E., Berthoz A., Amado I., « Real world referencing and schizophrenia: Are we experiencing the same reality? », *Neuropsychologia.*, 48(10), 2010 Aug, 2922-30.

Lebranchu P., Bastin J., Pelegrini-Issac M., Lehericy S., Berthoz A., Orban G.A. : « Retinotopic Coding of Extraretinal Pursuit Signals in Early Visual Cortex », 2010 Sept. 1, 20(9), 2172-2187.

Piccardi L., Berthoz A., Baulac M., Denos M., Dupont S., Samson S., Guariglia C. : « Different spatial memory systems are involved in small- and large-scale environments: evidence from patients with temporal lobe epilepsy », *Exp. Brain Res.*, 206(2), 2010 Oct, 171-7.

Poirel N., Vidal M., Pineau A., Lanoë C., Leroux G., Lubin A., Turbelin M.-R., Berthoz A., Houdé O., « Evidence of different developmental trajectories for length estimation according to egocentric and allocentric viewpoints in children and adults », *Exp. Psychology*, 2010.

Thirioux B., Mercier M.R., Jorland G., Berthoz A., Blanke O., « Mental imagery of self-location during spontaneous and active self-other interactions: an electrical neuroimaging study », *J. Neurosci.*, 30(21), 2010 May 26, 7202-14.

Vidal M. et Bühlhoff H.H., « Storing upright turns: How visual and vestibular cues interact during the encoding and recalling process », *Exp. Brain Res.*, 200(1), 2010 Jan, 37-49.

Vidal M. et Mossio M., « Can a 50 cents reward really choke working memory maintenance process? Commentary on Zedelius *et al.* », *Conscious Cogn.*, 2010 Jul 12.

Waisblat V., Mercier F.J., Langholz B., Berthoz A., Cavagna P., Benhamou D., « Effect of rocking motion on labor pain before epidural catheter insertion in the sitting position », *Ann. Fr. Anesth. Reanim.*, 29(9), 2010 Sep, 616-20.

## 2009

Bennequin D., Fuchs R., Berthoz A., Flash T., « Movement timing and invariance arise from several geometries », *PLoS Comput. Biol.*, 5(7), 2009 Jul, e1000426.

Jerbi K., Freyermuth S., Minotti L., Kahane P., Berthoz A., Lachaux J.P., « Watching brain TV and playing brain ball exploring novel BCI strategies using real-time analysis of human intracranial data », *Int. Rev. Neurobiol.*, 86, 2009, 159-68.

Rousié D.L., Deroubaix J.P., Joly O., Baudrillard J.C., Berthoz A., « Abnormal connection between lateral and posterior semicircular canal revealed by a new modeling process: origin and physiological consequences », *Ann. NY Acad. Sci.*, 1164, 2009 May, 455-7.

Zanelli G., Petrarca M., Cappa P., Castelli E., Berthoz A., « Reorientation ability of adults and healthy children submitted to whole body horizontal rotations », *Cogn Process*, 10 Suppl 2, 2009 Sep, S346-50.

## Ouvrages

Berthoz A., *La simplicité*, Paris, O. Jacob, Collection Science, 2009, 256 p.

Andrieu B., Berthoz A (éds), « Le corps en acte. À l'occasion du centenaire de la naissance de Maurice Merleau-Ponty (1908-1961) », Nancy, PUN, Épistémologie du corps, 2009.

Berthoz A., Ossola C. et Stock B. (dir.), *La pluralité interprétative* (« Conférences »), [En ligne], mis en ligne le 24 juin 2010, Collège de France, URL : <http://conferences-cdf.revues.org/154>.

## Chapitres d'ouvrages collectifs

Préface d'A. Berthoz, in B. Andrieu, *Le monde corporel. De la constitution interactive du soi*, L'Âge d'homme, 2010, 252 p.

A. Berthoz, « Les théories de Bergson sur la perception, la mémoire et le rire, au regard des données des neurosciences », in A. Fagot-Largeault, F. Worms (ed.), *Annales bergsoniennes IV – L'évolution créatrice 1907-2007 : épistémologie et métaphysique*, PUF, 2008, pp.163-78.

## Équipe Perception et exploration actives des objets

Responsable : Jacques Droulez

## Reuves à comité de lecture

Houillon A., Bessière P. et Droulez J., « The probabilistic cell: implementation of a probabilistic inference by the biochemical mechanisms of phototransduction », *Acta Biotheor.*, 58(2-3), 2010 Sep, 103-20.

Foubert L., Bennequin D., Thomas M.A., Droulez J., Milleret C., « Interhemispheric synchrony in visual cortex and abnormal postnatal visual experience », *Front. Biosci.*, 15, 2010 Jan 1, 681-707.

**Équipe Intégration interhémisphérique et perception sensorielle**  
**Responsable : Chantal Milleret**

**Reuves à comité de lecture**

Grantyn A., Kuze B., Brandi A.-M., Thomas M.-A., Quenech'du N., « Direct projections of omnipause neurons to reticulospinal neurons : A double labeling light-microscopic study in the cat », *Journal of Comparative Neurology*, 518(23), 2010, Dec 1, 4792-4812.

Kardamakias A.A., Grantyn A., Moschovakis A.K., « Neural network simulations of the primate oculomotor system. V. Eye-head gaze shifts », *Biological cybernetics*, 102(3), 2010, 209-225.

**Équipe Bases neurales de la mémoire spatiale et navigation**  
**Responsable : Sidney Wiener**

**Revue à comité de lecture**

Benchenane K., Peyrache A., Khamassi M., Tierney P.L., Gioanni Y., Battaglia F.P., Wiener S.I., « Coherent theta oscillations and reorganization of spike timing in the hippocampal- prefrontal network upon learning », *Neuron.*, 66(6), 2010 Jun 24, 921-36.

Peyrache A., Benchenane K., Khamassi M., Wiener S.I., Battaglia F.P., « Sequential Reinstatement of Neocortical Activity during Slow Oscillations Depends on Cells' Global Activity », *Front. Syst. Neurosci.*, 3, 2010 Jan 4, 18.

Girardeau G., Benchenane K., Wiener S.I., Buzsáki G., Zugaro M.B., « Selective suppression of hippocampal ripples impairs spatial memory », *Nat. Neurosci.*, 12(10), 2009 Oct, 1222-3.

Ramadan W., Eschenko O., Sara S.J., « Hippocampal sharp wave/ripples during sleep for consolidation of associative memory », 4(8), 2009 Aug 20, e6697.

Herwik S., Kisban S., Aarts A.A.A., Seidl K., Girardeau G., Benchenane K., Zugaro M.B., Wiener S.I., Paul O., Neves H.P., Ruther P., « Fabrication technology for silicon-based microprobe arrays used in acute and sub-chronic neural recording », *MicroMechanics Europe Workshop (MME)*, no 19, vol. 19, no 7, Aachen, 2009, notes 074008.1-074008.

AUTRES TRAVAUX ET ACTIVITÉS DU PR. ALAIN BERTHOZ

**Conférences et colloques sur invitation**

*Conférences plénières/présidences de séances*

« Contributions vestibulaires aux mécanismes corticaux de la navigation et de l'orientation spatiale », séance plénière, 44<sup>e</sup> symposium d'otoneurologie, *Vestibule et Cortex*, 14 (15,16) mai 2010, Paris, France.

« De l'espace à l'empathie : bases neurales des changements de point de vue », conférence plénière, *Journées de Neurologie de langue française*, 29 avril 2010, Lyon, France.

« New Frontiers between IST, Robotics and Cognitive Neuroscience », conférence plénière, *Science beyond fiction*, FET, 21-23 avril 2010, Prague, République tchèque.

« Principes simplificateurs dans la perception, le contrôle du mouvement et de la marche. La notion de simplicité », conférence plénière de clôture, *colloque Chimie et Sport*, Fondation de la Maison de la Chimie, 24 mars 2010, Paris, France.

Président des séances « Transfer of Adaptation between Feedback and Feedforward controllers » et « Neural encoding and decoding », *Israeli-France Workshop in Neurorobotics*, 10 janvier 2010, Paris, France.

« Principles of human multisensory integration, gaze control and locomotion, which may guide the design of humanoids », *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, conférence plénière, 10 décembre 2009, Collège de France, Paris, France.

## 2010

« The development and control of locomotion ». *Perceptual and cognitive approach to action development in typical children and in children with cerebral palsy*, Journée interne organisée avec la Fondation motrice, 5 juillet 2010, Paris, France.

« Base neurale de l'échange avec autrui par le regard et le geste », *colloque d'hommage à Julian de Ajuriaguerra*, partenariat Chaire/Association Corps & Psyché, (1<sup>er</sup>) 2 juillet 2010, Paris, France.

« L'espace et le cerveau », conférence de l'exposition *Une image peut en cacher une autre*, Galeries nationales du Grand Palais, 31 juin 2010, Paris, France.

« Plasticité ou vicariance, réhabilitation ou remédiation : rôle de la cognition dans la récupération et compensation des fonctions sensori-motrices », 2<sup>e</sup> Journée scientifique IFPEK *Le contrôle moteur : de la perception à l'action*, 11 juin 2010, Rennes, France.

« Role of gaze for the steering and anticipation of locomotor trajectories », *Workshop Perception and Action*, 1<sup>er</sup> juin (30 mai/04 juin) 2010, Marburg, Allemagne.

« The brain and space », Université von Humbolt, Département de psychologie, 25 mai 2010, Berlin, Allemagne.

« Opening remarks », « *Sensorimotor computation: the control of gaze* », séminaire organisé au Collège de France par les Pr. A. Berthoz et D. Pai du (et avec le soutien) Peter Wall Institute for Advanced Studies, University of British Columbia, 3 mai 2010, Paris, France.

« Décider », Faculté des sciences psychologiques et de l'éducation *Journée scientifique Raison et Emotion*, 24 avril 2010, Bruxelles, Belgique.

« Kinesthetic empathy : a spatial theory of the difference between sympathy and empathy », *International Conference Watching Dance Project*, 23 avril 2010, Manchester, RU.

« La simplicité », Club des Vigilants, 15 avril 2010, Paris, France.

« Adaptation du dôle du système vestibulaire dans le passage terre-mer », *Sortir de l'eau ou le passage de la vie aquatique à la vie terrestre*, séminaire de la chaire de médecine expérimentale du Collège de France (Pr. P. Corvol), 8 avril 2010, Paris, France.

« Le cerveau et l'espace, entre le réel et le virtuel. Une illustration de la simplicité du vivant », 3<sup>e</sup> Journée ThÉRUV *Illusion – Perception – Action*, 6 avril 2010, Laval, France.

« Base neurale de la décision », dans le cadre de la conférence-débat : « *Neuroéconomie et prise de décisions chez des agents économiques : Neurosciences, économie expérimentale et subjectivité* », Centre d'épistémologie clinique et Association française de psychiatrie, 9 mars 2010, Paris, France.

Atelier « *Trajectoires locomotrices en espace libre* », réunion interne du projet ANR *Locanthrope*, (3) 4 mars 2010, Toulouse, France.

« Autisme et empathie : importance de la perception des espaces dans la relation à autrui », journées nationales ANCRA de l'autisme *Spécificités des fonctionnements de la personne avec autisme*, (28) 29 janvier 2010, Dijon, France.

« Principles of human locomotion which could be useful for the design of humanoids », *Israeli-France Workshop in Neurorobotics*, 10 janvier 2010, Paris, France.

2009

Intervention au 40<sup>e</sup> anniversaire de l'Institut international des droits de l'Homme, 14 décembre 2009, Strasbourg, France.

« Données récentes sur les bases neurales du contrôle du geste, le maintien de l'équilibre et l'orientation spatiale », *50 ans du CDI*, (7), 8, (9) décembre 2009, Paris, France.

Table ronde « Maths et sciences contemporaines. Comment de nouvelles avancées scientifiques stimulent-elles la recherche en mathématiques ? », *Maths à venir*, 1<sup>er</sup> (2) décembre 2009, Paris, France.

« Éléments de rétrospective et de prospective. Les nouveaux partenaires des sciences de la cognition », colloque de perspective (PIRSTEC), *Sciences et technologies cognitives*, 23 octobre 2009, Paris, France.

« La décision, entre raison et émotion : un exemple de simplicité », séminaire de management pour les directeurs, 12<sup>e</sup> promotion, ENA, 5 (- 8) octobre 2009, Villepreux, France.

« Stratégies cognitives pour la manipulation des référentiels spatiaux. Études en IRMf et enregistrement chez les patients épileptiques », conférence-débat et controverse *Le cerveau et l'espace : bases neurales, pathologie et modélisation de la mémoire spatiale*, 10 février 2009, Académie des sciences de l'Institut de France, Paris, France

#### *Communication à des congrès avec abstracts/posters*

Venture G., « Human Characterization and Emotion Characterization from Gait », *Proc. of the IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology*, pp. 1292-1295, Buenos Aires, Argentina, 2010.

Dupierriex E., Berthoz A., « Flexibility of the cognitive system to use various spatial coding: implication for driving situation », *Driving Simulation Conference, 2010*, 9, 10 septembre, Paris France.

Bengoetxea A., Busoni E., de Saedeleer C., Cebolla A.M., Petieau M., Berthoz A., McIntyre J., Cheron G., « Effect of weightlessness in a virtual navigation task: adaptation of EEG evoked potentials during the changes of perceived motion direction », congrès *Life in Space for Life on Earth*, 13-18 juin, Trieste, Italie.

Barra J., Berthoz A., « Neural correlates of encoding space and shortcut finding from route, slanted and survey perspectives », *2010 HBM Annual Meeting*, 6-10 juin, Barcelone, Espagne.

Sulpizio V., Galati G., Comitteri G., Lambrey S., Berthoz A., « Seeing the world from different views: neural correlates of perspective taking and spatial updating », *2010 HBM Annual Meeting*, 6-10 juin, Barcelone, Espagne.

Diard J., Panagiotaki P., Berthoz A., « Biomimetic Bayesian models of navigation: How are environment geometry-based and landmark-based strategies articulated in humans? », Proceedings of the International Conference on Cognitive Modeling (ICCM 2009).

Sreenivasa M., Souères P., Laumond J.-P., Berthoz A., « Steering a humanoid robot by its head », IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Saint Louis, États-Unis, 2009.

#### **Organisation de colloques**

Organisation du *Colloque d'hommage à Julian de Ajuriaguerra*, en partenariat avec l'Association Corps & Psyché (Fabien Joly) les 1<sup>er</sup> et 2 juillet 2010, au Collège de France. (500 participants).

Organisation du 44<sup>e</sup> symposium d'otoneurologie *Vestibule et Cortex*, 14 & 15 mai 2010, Paris, France (150 participants).

Organisation du séminaire « *Sensorimotor computation: the control of gaze* » au Collège de France avec le Pr. D. Pai du (et avec le soutien) Peter Wall Institute for Advanced Studies, University of British Columbia, 3 mai 2010, Paris, France (50 participants).

Organisation de la Journée du 10 décembre au Collège de France dans le cadre du 9<sup>th</sup> IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (200 participants).

Conférence-débat et controverse, Académie des sciences de l'Institut de France : « Le cerveau et l'espace : Bases neurales, pathologie et modélisation de la mémoire spatiale », 10 février 2009.

Organisation de l'atelier de la RATP sur « Cognition et mobilité » (5 séminaires et un atelier).

#### AUTRES ACTIVITÉS DU PR A. BERTHOZ

##### **Participation à l'organisation de la recherche**

Membre du conseil consultatif pour la Science France/Japon.

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 du comité scientifique de l'AIIST-CNRS Joint Japanese-French Robotics Laboratory (JRL).

Membre du comité de revue du département des sciences de la vue EPFL Lausanne.

Membre du conseil d'orientation du PRES Paris Centre.

Membre du conseil scientifique l'Institut d'études avancées ENS, EHESS, Maison Suger, Paris.

Président de l'Institut de biologie du Collège de France.

Membre du comité d'orientation et de pilotage du programme FAGSHIP de la communauté européenne.

Membre du comité scientifique de la Fondation des Aveugles de France.

Membre du conseil d'administration de la Fondation Cotrel de l'Institut de France.

Consultation par l'Académie des technologies dans le cadre du rapport sur les transports.

Co-président du comité de pilotage de l'action de prospective de la RATP sur « Cognition et mobilité ».

Membre du comité de veille stratégique de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière.

##### **Collaboration avec l'industrie**

Contrat de coopération avec EDF.

Coopération avec RENAULT dans le cadre du projet MOVES.

Coopération avec Archivideo dans le cadre du projet SCORE.

Coopération avec Dassault systèmes dans le cadre du projet SCORE.

Coopération avec ALDEBARAN dans le cadre du projet ROMEO.

##### **Contrats de recherche et coopérations internationales**

###### *Projets ANR*

AVE « Art Visuel et Emotion » ; coordinateur : Institut Jean Nicod.

LOCANTRHOPE « Fondements calculatoires de la locomotion humaine » ; coordinateur : LAAS-CNRS.

PERSEMOC « Perception sémiotique et socialité du sens : formes, sens commun, activités symboliques » ; coordinateur : CNRS UMR 7114.

### *Projets Pôles de compétitivité*

MATISS « Modélisation avancée et techniques interactives de simulation pour la sécurité » ; coordinateur : Renault Recherche Innovation Regienov.

ROMEO « Robot compagnon et assistant personnel » ; coordinateur : ALDEBRANA Robotics SA.

### *Divers*

Fondation Cotrel – protocole de collaboration et de recherche scientifique : « Rôle des asymétries cérébelleuses et vestibulaires dans la scoliose idiopathique de l'adolescent ». LPPA - CNRS / Collège de France ; Dominique Rousié (Lille).

Fondation Motrice. Projet sur la rééducation de la marche avec l'université de Pise et Hôpital Stella Maris.

Neuropôle de recherche francilien, Plateau « NEUROPACKT » ; coordinateur : INSERM.

DGCIS, projet SCORE « Serious games for Cybertherapy in pOpulated REalistic city » ; coordinateur ARCHIVIDEO.

### *Contrats européens (7<sup>e</sup> PCRD)*

CLONS « A closed-loop neural prosthesis for dizziness suppression ». – Coordinateur : Scuola Superiore Di Studi Universitari E Di Perfezionamento Sant'Anna (Pise, Italie).

ROBOSOM « A Robotic Sense of Movement ». – Coordinateur : Scuola Superiore Di Studi Universitari E Di Perfezionamento Sant'Anna (Pise, Italie).

## THÈSES

### **Direction et thèses soutenues**

Olive I., « *The Screen-as-skin theory: Rapid Plasticity of Human Body Schema during Moving Image Viewing / L'Écran-Peau : Plasticité rapide du schéma corporel humain pendant le visionnement de l'image en mouvement* », 7 janvier 2010.

Pham Q.-C., « Étude de trajectoires locomotrices humaines », 11 décembre 2009.

Ingloi K., « Bases neurocognitives des stratégies de navigation chez l'Homme », 13 octobre 2009.

Thirioux B., « Contribution to the neural bases of empathy and self-other relationships », 6 juillet 2009.

### **Jury**

Ferreira J., « *Mibilis in immobili*. La perception du mouvant dans l'œuvre d'art inanimée » (Dir. P. Baque), 18 janvier 2010.