

## Physiologie de la perception et de l'action

M. Alain BERTHOZ, professeur

Le cours n'a pas eu lieu.

### SÉMINAIRES

*Séminaires des cours du Professeur Alain Berthoz.*

#### BASE NEURALE DE L'EMPATHIE ET DE LA CONNAISSANCE D'AUTRUI

10 janvier : Gérard JORLAND (École Pratique des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris).

*L'empathie, histoire d'un concept.*

17 janvier : Giacomo RIZZOLATTI (Université de Parme, Italie).

*Mirror neurons : a system for understanding and interacting with other individuals.*

24 janvier : Jean DECETY (INSERM, Lyon).

*La compréhension des actions et des intentions d'autrui : neuroanatomie fonctionnelle et théorie de la simulation.*

30 janvier : Françoise SIRONI (Université Paris VIII).

*Comment devient-on un bourreau ? Les mécanismes de destruction de l'autre.*

7 février : Ray DOLAN (University College, Londres).

*The brain basis of empathy and its role in behavioural regulation.*

28 février : Jean-Denis DEGOS & Anne-Catherine BACHOUD-LEVI (CHU Henri Mondor, Créteil).

*Contribution de la neuropsychologie : Désignation et rapport à autrui.*

7 mars : Jean-Louis ADRIEN (Université de Tours).

*Empathie et autisme.*

*Séminaire de professeur invité sur chaire du Collège de France*

20 et 27 septembre : Pr T. ONO, Toyama Medical and Pharmaceutical University, Japon.

— *Brain and Emotion.*

— *Brain and Memory.*

#### ACTIVITÉ DU LABORATOIRE

(UMR CNRS/Collège de France C9950)

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

A. GRANTYN, B. KUZE (Université de Gifu), A.K. MOSCHOVAKIS (Université de Crète), A.-M. BRANDI, D. DUBAYLE, en collaboration avec W. GRAF, G. UGOLINI (LGV, Gif-sur-Yvette)

#### *1.1. Substrat anatomique de la transformation spatio-temporelle chez le primate*

Les neurones efférents du collicule supérieur (CS) spécifient l'amplitude et la direction des saccades par leur position sur la carte motrice. Les paramètres des saccades sont donc codés dans le domaine *spatial*. Par contre, les réseaux pré-moteurs de la formation réticulée qui contrôlent directement l'activité des motoneurones « générateurs saccadiques » utilisent un code *temporel*, c'est-à-dire la fréquence et la durée des décharges. Le processus du changement du code, nommé « la transformation spatio-temporelle », est inclus dans tous les modèles du système saccadique. Ces modèles font l'hypothèse que l'intensité des effets synaptiques des neurones du CS sur les générateurs saccadiques varie en fonction de l'excentricité de la carte motrice. Une telle variation de l'efficacité peut provenir de nombreux facteurs dont les plus accessibles à une vérification expérimentale sont :

- 1) la fréquence des décharges des neurones efférents du CS ;
- 2) le nombre des terminaisons synaptiques qui lient ces neurones aux générateurs saccadiques ;
- 3) la densité des neurones efférents.

Dans les études sur les primates (singes), il a été démontré que le premier mécanisme n'est pas valable. Les deux suivants n'ont pas été explorés.

Nous avons entrepris une étude portant sur l'hypothèse que les gradients de la densité des neurones efférents pourraient contribuer à la transformation spatio-temporelle. Notre approche expérimentale a été fondée sur l'utilisation du virus rabique comme marqueur rétrograde transneuronal des connexions anatomiques. L'étude a été faite en collaboration avec G. Ugolini (Laboratoire de Génétique des Virus), qui a développé la technique du marquage, A.K. Moschovakis (Uni-

versité de Crète) et l'équipe de W. Graf au LPPA. Le virus rabique, introduit par injection dans un muscle, se propage par la voie intra-axonale pour atteindre les motoneurones. Après la réplication, il affecte, exclusivement par des contacts synaptiques, les neurones prémoteurs, ceux qui établissent les connexions mono synaptiques avec les motoneurones. En fonction du temps passé entre l'inoculation et le sacrifice de l'animal, les connexions de plus en plus distantes et complexes peuvent être révélées, en gardant la spécificité du marquage qui se limite au système des neurones contrôlant, directement ou indirectement, le muscle infecté. Nous avons analysé, chez le singe, la distribution topographique des neurones du CS marqués après l'injection du virus dans le muscle droit latéral, qui effectue la rotation de l'œil dans le plan horizontal (abduction). Le marquage du CS était absent au stade de 2,5 jours après l'inoculation, le temps de survie n'étant suffisant que pour la révélation des connexions directes (mono synaptiques) avec les motoneurones. Dans les expériences où le temps de propagation du virus a été prolongé à 3 (Exp.-3 j) et 3,5 (Exp.-3,5 j) jours nous avons compté, respectivement, 300 et 3 235 neurones colliculaires marqués de côté opposé à l'injection. A partir des coupes dans le plan frontal, ces neurones ont été cartographiés et mis en registre avec les contours du CS et ses couches cytoarchitectoniques, en utilisant un système de reconstruction en trois dimensions (NeuroLucida). Les distributions des neurones étaient ensuite étudiées par rapport aux coordonnées de la carte motrice du CS (Robinson, 1972).

Si on se limite à des saccades strictement horizontales, les plus pertinentes au problème de la transformation spatio-temporelle sont les distributions de la densité des neurones le long du méridien horizontal ( $M_H$ ). Ces distributions étaient non uniformes et qualitativement différentes dans les deux expériences, uni modale dans Exp.-3 j et bi-modale dans Exp.-3,5 j. Pour simplifier la comparaison, il est opportun d'utiliser la sous division physiologique du CS en « zone de fixation » (le tiers rostral du CS) et « zone des saccades », recouvrant les deux tiers caudaux du CS. La première contient deux types de neurones : les « neurones de fixation » qui interrompent leur décharge tonique pendant les saccades et les neurones phasiques qui contrôlent les saccades ayant les composants horizontaux ( $R_H$ ) de faible amplitude ( $R_H < 5^\circ$ ). La seconde ne contient que les neurones phasiques qui, en fonction de leur éloignement du pôle rostral, codent les amplitudes plus grandes ( $R_H$  5-50°).

Dans l'expérience au court temps d'exposition (Exp.-3 j) la zone de fixation était très faiblement marquée, et la densité des neurones était constante dans la région des  $R_H$  de  $0^\circ$  à  $7^\circ$ . L'expérience Exp.-3,5 j était caractérisée par une forte accumulation des neurones près du pôle rostral, avec un maximum à  $R_H \cong 2^\circ$  et une décroissance vers un minimum près de  $R_H = 5^\circ$ , correspondant à la limite entre la « zone de fixation » et la « zone des saccades ». Au-delà de cette limite, la densité augmentait de façon régulière jusqu'au maximum situé à  $R_H \cong 45^\circ$  (Exp.-3 j) et  $R_H \cong 40^\circ$  (Exp.-3,5 j) pour ensuite descendre rapidement vers l'extrémité caudale du  $M_H$ . Dans l'Exp.-3 j, le gradient rostro-caudal pouvait être

décrit par une fonction exponentielle entre  $R_H = 5^\circ$  et  $R_H = 45^\circ$ . Son décours était plus complexe dans l'Exp.-3,5 j, suggérant la présence d'un nouveau contingent des neurones, rostralement par rapport au maximum de la distribution. Cette observation, mise ensemble avec l'apparition d'un contingent supplémentaire dans la « zone de fixation » de l'Exp.-3,5 j, nous laisse conclure que la distribution de la densité obtenue à un stade plus précoce (Exp.-3 j) est plus représentative des neurones phasiques contrôlant les saccades. Ceci est en accord avec les données indiquant que les neurones de cette classe ont les connexions les plus robustes avec le générateur saccadique, donc indirectement avec les neurones du noyau abducens.

A ce stade de l'étude notre conclusion la plus importante est que les neurones contrôlant les saccades horizontales n'ont pas une densité uniforme le long du méridien horizontal de la carte motrice. En effet, les modèles actuels du CS, qui traitent le problème de la transformation spatio-temporelle, incluent comme éléments :

- 1) la constance de la taille des foyers actifs pour saccades de toutes amplitudes ;
- 2) la constance de la densité des neurones efférents dans toutes les régions de la carte motrice.

Le premier élément est prouvé expérimentalement (Munoz et Wurtz, 1995 ; Anderson *et al.*, 1998), le second a été introduit arbitrairement. Par conséquent, la nécessité d'un ajustement des modèles découle de nos résultats, qui démontrent une croissance de la densité, en corrélation avec la croissance de l'amplitude des saccades représentées le long du méridien horizontal. Nous avons commencé une étude de modélisation pour évaluer dans quelle mesure les gradients de la densité peuvent servir à la transformation spatio-temporelle. En effet, leur présence pourrait refléter, au moins partiellement, une adaptation anatomique liée à la non-linéarité de la carte motrice.

## 2. COORDINATION DES MOUVEMENTS DES YEUX DANS L'ESPACE NATUREL 3D

### 2.1. « L'EFFET GAMME » EXISTE AUSSI CHEZ LES ENFANTS STABILIQUES (Z. KAPOULA et M.P. BUCCI en collaboration avec le Centre national d'Ophthalmologie des Quinze-Vingts)

Une étude préalable de Kapoula (1985) a montré que chez le sujet adulte normal la précision de la saccade oculaire est influencée par le contexte. En effet, il existe un biais de réponse, connu comme « effet de gamme » que l'on observe aussi pour les mouvements de la main (voir Poulton, 1979 et plus récemment Smyrnis *et coll.*, 2001). La conséquence de cet effet est que le mouvement est précis lorsque la cible est située en position du milieu de la gamme des positions étudiées, alors qu'il est trop large pour des positions les moins excentrées et trop court pour les positions les plus excentrées.

L'objectif de cette étude était d'examiner la présence de cette stratégie chez l'enfant strabique. Pour ce faire nous avons enregistré les saccades horizontales des deux yeux simultanément avec une méthode non-invasive (IRIS, SKALAR), infrarouge montée sur des lunettes chez cinq enfants (5-15 ans) strabiques recruté au CHNO des Quinze-Vingts. L'enfant était invité à fixer le plus précisément possible une cible (diode) qui sautait à 5°, 10° ou 15° à droite ou à gauche. Le strabisme était convergent ( $\square$  26°) chez trois enfants et divergent ( $\square$  12°) chez les deux autres enfants. Tous les enfants avaient une acuité visuelle bonne (8/10) aux deux yeux.

Nous avons montré, pour la première fois, que l'enfant strabique dès cinq ans présente l'effet de gamme pour ses saccades horizontales et que cette stratégie, motrice ou cognitive, existe quel que soit le type de strabisme et quelle que soit la condition de vision (monoculaire ou binoculaire). Plus important, les saccades des deux yeux obéissent à cet effet alors qu'un seul œil peut fixer la cible. En conclusion, comme chez le sujet adulte normal, cette stratégie existe aussi chez le jeune enfant strabique, malgré leur déficit de perception spatiale (voir Fronius et Sireteanu, 1994). Cette étude fait l'objet d'un article sous revue au journal *Exp. Brain Research*.

## 2.2. DÉTERMINATION DES POSITIONS PRIVILÉGIÉES DU REGARD DU CONDUCTEUR EN VISION PROCHE

S. PARIS-DONNET (CIFRE Peugeot Citroën, Vélizy), Z. KAPOULA

Le thème de recherche est l'aide à la réalisation de la tâche de conduite en conditions d'environnements adverses (nuit, brouillard). L'objectif de la thèse est de mieux comprendre les mécanismes de perception visuelle du conducteur. Les résultats de ces travaux doivent permettre d'apporter des éléments pour guider la conception de nouveaux systèmes automobiles pour assister le conducteur dans la perception de son environnement. L'objectif global est de déterminer les positions privilégiées du regard afin de percevoir et mémoriser le plus rapidement les informations pertinentes en vision proche par l'étude des saccades.

Une expérimentation avec enregistrement des mouvements des yeux est en cours de réalisation. Le but est de tester l'influence du niveau de traitement cognitif et du positionnement de l'information sur les caractéristiques spatio-temporelles des patterns d'exploration oculomotrice en condition de conduite réelle. Pour enregistrer les mouvements oculaires, un oculomètre Eye Tracking System est utilisé. Trois positions d'affichage ainsi que deux types d'informations (information de vitesse permanente et information d'alerte flashée) sont testés. Les sujets sont testés sur route réelle comprenant de la nationale et de l'autoroute. L'hypothèse est qu'en fonction de l'emplacement de l'écran et du type d'informations, les paramètres oculomoteurs enregistrés auront des propriétés différentes. Les caractéristiques des patterns oculaires, telles que la durée des saccades, des fixations seront analysées en fonction de la position de l'écran. Cette base de données nous permettra de définir des positions optimales pour disposer des informations importantes.

2.3. LATENCE DES MOUVEMENTS DU REGARD DANS L'ESPACE 3D : RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES CHEZ L'ENFANT NORMAL ET L'ENFANT AVEC DES TROUBLES D'ÉQUILIBRE ET DE LA VERGENCE OCULOMOTRICE

Z. KAPOULA, M.-P. BUCCI, Q. YANG en collaboration avec le service d'ORL de l'hôpital Robert-Debré (DR. S. WIENER-VACHER) et le service d'ophtalmologie du même hôpital (DR. D. BRÉMOND-GIGNAC)

Pour explorer le monde tridimensionnel nous effectuons le plus souvent trois types de mouvements : des saccades — mouvements rapides pour changer la direction du regard (horizontale ou verticale) ; des mouvements de vergence qui permettent d'ajuster l'angle des axes visuels selon la distance de l'objet fixé. Dans l'espace naturel, le plus souvent les objets diffèrent aussi bien en distance qu'en direction ; nous effectuons donc des mouvements combinés (en direction et en distance). Des développements technologiques pendant la dernière décennie ont permis d'enregistrer chez l'adulte la saccade, la vergence et les mouvements combinés des deux yeux simultanément. Des études similaires chez l'enfant sont, à notre connaissance, rares, voir inexistantes.

Depuis septembre 2000 nous avons entrepris une opération de recherche en coopération avec les services ORL (Dr. S. Wiener-Vacher) et OPH (Dr. D. Brémond-Gignac) de l'hôpital Robert Debré pour examiner les mouvements oculaires dans l'espace 3D chez l'enfant de 5 à 15 ans.

Un dispositif de stimulation visuelle tridimensionnelle est utilisé pour provoquer de façon aléatoire des saccades latérales en vision lointaine ou en vision proche, des mouvements de vergence isolée (de convergence ou de divergence le long du plan médian), et des mouvements combinés en direction et en distance. Les mouvements des deux yeux ont été enregistrés par la méthode non-invasive basée sur des rayons infrarouges « Oculometer BOUIS ». Nous avons jusqu'au présent étudié dix enfants sans trouble visumoteur d'âge de 4,5 ans à 12 ans. Nous avons étudié la latence d'un mouvement oculaire, qui est l'intervalle entre l'apparition de la cible et le déclenchement du mouvement. Elle inclue des multiples processus, à savoir, le désengagement de l'attention de la fixation oculomotrice, la décision à effectuer un mouvement, le calcul des paramètres du mouvement. La latence peut donc être un indicateur cognitif important du développement de l'enfant.

L'on observe une diminution de la latence avec l'âge pour tous les trois types de mouvements (saccade, vergence, mouvement combiné). De façon intéressante, quel que soit l'âge la latence de la divergence est plus courte que celle de la saccade et de la convergence. La rapidité du déclenchement de la divergence pourrait être due à un déplacement de l'attention visuelle plus rapide, car elle est dirigée vers l'espace extra-personnel qui est d'importance vitale. Chez les jeunes enfants les mouvements combinés présentent des latences plus longues que les mouvements isolés de la SACCADE OU DE LA VERGENCE. Par ailleurs, pour les mouvements combinés, le déclenchement de la composante de vergence précède

systématiquement celui de la composante de la saccade. Les données préliminaires suggèrent aussi une augmentation du nombre des mouvements combinés avec déclenchement simultané de deux composantes et une réduction du décalage temporel entre les deux composantes. Ainsi l'étude des mouvements combinés apporte des informations importantes sur le développement de la capacité de l'enfant à guider son regard de façon rapide et efficace vers des objets situés dans l'espace 3D.

Nous avons, jusqu'à maintenant étudié 12 enfants avec des troubles d'équilibre et des céphalées. L'examen clinique vestibulo-oculaire chez ces enfants était normal. Durant les tests orthoptiques cependant, ces enfants ont montré un ou plusieurs des signes typiques d'insuffisance de vergence (point de convergence maximale éloigné, limite d'amplitude de fusion, phobie, à savoir déviation latente des axes visuels).

Chez ces enfants, la latence est plus longue que celle des enfants d'âge similaire, en particulier pour les mouvements de la convergence ; ces latences présentent également une variabilité intra et inter-sujet très importante. Nous avons effectué des enregistrements chez les mêmes enfants après 12 séances de rééducation orthoptique. Ces exercices orthoptistes consistent à demander à l'enfant des efforts de vergence (convergence et divergence) en suivant une cible pointue qui s'approche et s'éloigne de l'enfant. Les résultats très préliminaires suggèrent qu'après rééducation orthoptique de la vergence oculaire, les enfants effectuent tous les types de mouvements oculaires dans l'espace 3D (saccade, la vergence pure et les mouvements combinés) avec une latence plus brève.

Ainsi l'enregistrement objectif et l'analyse fine des mouvements des deux yeux dans l'espace 3D chez l'enfant permet d'objectiver un trouble liée à la vergence et aussi de mieux connaître la physiopathologie de la vergence. La différence de latence pour les différents types des mouvements permet de dissocier entre les problèmes attentionnels généraux et les problèmes spécifiques au dysfonctionnement du système de la vergence oculomotrice.

Ces résultats ont été présentés au 8<sup>e</sup> congrès « Child Vision Research Society » qui s'est déroulé à Paris (14-16 juin) et feront l'objet des articles.

#### 2.4. LE MOUVEMENT DU REGARD DANS L'ESPACE 3D CHEZ L'ENFANT STRABIQUE AVANT ET APRÈS CHIRURGIE DU STRABISME

M.P. BUCCI, Z. KAPOULA, Q. YANG en collaboration avec le Dr. D. BRÉMOND-GIGNAC (service d'ophtalmologie de l'hôpital Robert-Debré)

Une étude commencée au CHNO des Quinze-Vingts en 1999 limitée aux saccades horizontales montrait une harmonisation de la coordination binoculaire des saccades après chirurgie du strabisme. Ces résultats font l'objet d'un article soumis à *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. Ce programme se poursuit à l'hôpital Robert Debré avec l'étude des mouvements des deux yeux dans l'espace 3D (saccades, vergence et mouvements combinés) avant et après chirurgie.

## 2.5. COORDINATION BINOCULAIRE DU MOUVEMENT DES YEUX CHEZ LES SUJETS

### HYPERPHORIQUES

H. PUECH, Z. KAPOULA

L'hyperphorie est relativement fréquente : sa prévalence atteint 10 à 20 % de la population. Sa décompensation donne lieu à une symptomatologie associée à la vision dynamique, notamment la lecture, et pose le problème du contrôle moteur de l'alignement vertical des yeux, qui reste aujourd'hui encore mal connu. En particulier, ses interactions avec le contrôle moteur horizontal du mouvement des yeux sont quasiment inexplorées. Nous avons donc mené une étude optométrique et oculomotrice comparée portant sur le contrôle oculomoteur de l'alignement vertical des yeux, et en particulier sur la coordination binoculaire de la saccade chez le sujet hyperphorique.

Un bilan optométrique a permis de sélectionner six sujets non presbytes. Munis de leur correction habituelle, tous possédaient une acuité stéréoscopique d'au moins 40'' en vision de près ; tous révélaient une hyperphorie comprise entre 0,5 et 3Δ, en vision de près comme de loin. Un seul sujet portait une correction prismatique. Tous les autres présentaient des plaintes, notamment associées à la vision de près et à la lecture. Les tests ont tous été réalisés en vision rapprochée en relation avec les plaintes et la lecture. Différentes méthodes optométriques d'évaluation de la déviation ont été utilisées, pour être comparées à l'évaluation oculomotrice des sujets. Cette évaluation a été réalisée par la méthode lentilles de contact — champ magnétique, qui offre une précision de l'ordre de 0,05° soit quelques minutes d'arc. Le paradigme utilisé consistait à réaliser des saccades volontaires verticales et horizontales à partir de différentes positions de regard, dans trois conditions de vision, vision monoculaire de l'œil directeur, vision monoculaire de l'œil dirigé et vision binoculaire.

### *Hétérophorie*

Nos premiers résultats, obtenus à partir de la position de regard droit devant, montrent en particulier que les mesures optométriques de la déviation sont très peu corrélées à l'évaluation objective oculomotrice. L'écart entre résultats oculomoteurs et mesures optométriques de la déviation est à rapprocher de l'écart entre conditions oculomotrices de vision dynamique et conditions optométriques de vision statique. Dans la fenêtre temporelle intersaccadique, de l'ordre de 300 ms, l'alignement statique est affecté par l'alignement dynamique. Il apparaît ainsi que les saccades accélèrent la désadaptation de la vergence peut-être par interruption du signal tonique, à moins qu'ils ne désignent un mécanisme d'adaptation dynamique de la vergence séparé.

### *Coordination binoculaire des saccades*

Nos premiers résultats indiquent également une coordination binoculaire normale des saccades, à l'exception d'une certaine perte de l'alignement vertical



pendant la saccade horizontale. Les études manquent chez le sujet normal pour autoriser une comparaison. Cette perte d'alignement pose cependant le problème des adaptations orthogonales et pourrait indiquer une fragilité de l'adaptation verticale, spécifiquement de l'adaptation verticale croisée associée aux mouvements latéraux.

Ces résultats préliminaires ont fait l'objet d'un poster affiché lors la conférence EMCO à Rotterdam (Puech *et al.* 2000). Ils devront être complétés par une analyse bidimensionnelle des positions excentrées du regard qui permettra en particulier de rechercher un effet de la position des yeux sur la coordination binoculaire de leurs mouvements.

#### 2.6. EFFET DE LA STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANIENNE DU CORTEX PRÉFRONTAL SUR LE DÉCLENCHEMENT DE LA SACCADÉ, DE LA VERGENCE, ET DES MOUVEMENTS COMBINÉS

O. COUBARD, Z. KAPOULA. En collaboration avec R. MÜRI (Université de Berne), S. RIVAUD et C. PIERROT-DESEILLIGNY (Unité 289 INSERM, hôpital de la Salpêtrière)

La technique de stimulation magnétique transcrânienne (SMT) est utilisée de plus en plus comme outil d'investigation du substrat cortical d'activités cognitives plus ou moins complexes. Par l'induction d'un champ magnétique perturbant l'activité neuronale, cet outil permet l'étude, à l'instar de l'examen du patient cérébrolésé, de l'activité cognitive en regard de la condition cérébrale correspondante. Dans nos travaux, nous étudions plus particulièrement le rôle du cortex préfrontal (CPF) dans le déclenchement des mouvements oculaires. Pour commencer, nous étudions les mouvements oculaires réflexes suscités par la paradigme expérimental dit « gap » dans lequel une discontinuité temporelle (durée efficace de 200 millisecondes) entre l'extinction d'un point de fixation et l'apparition d'une cible favorise l'émergence de ces mouvements appelés « express ».

Dans une perspective écologique, l'étude porte non seulement sur des mouvements oculaires de version simple (mouvements en latéralité suivant une courbe d'isovergence) et de vergence simple (mouvements en profondeur le long d'une ligne d'isoversion), mais également et surtout sur des mouvements dits « combinés » dans lesquels le regard se déplace à la fois en latéralité et en profondeur (version + vergence). Ce dernier type de mouvement s'apparente donc davantage aux mouvements oculaires effectués au quotidien.

Dans une de nos études, trois hommes et trois femmes d'âge moyen  $33,8 \pm 7,7$  années (étendue 22-43 ans) ont déplacé leur regard sur un plan horizontal en même temps qu'était stimulé par la SMT leur CPF droit, dont nous faisons l'hypothèse qu'il jouait un rôle inhibiteur dans le déclenchement des mouvements oculaires réflexes (de version et/ou de vergence). A l'aide d'un dispositif infra-rouge (IRIS), nous enregistrons les mouvements horizontaux effectués par les

deux yeux simultanément depuis un point de fixation situé à 150 cm du sujet (sur l'axe médian) vers une cible à  $\pm 20$  degrés en latéralité (version simple) ou à 20 cm du sujet sur le même axe médian (convergence simple) ou vers une cible située à  $\pm 20$  degrés en latéralité et à 20 cm du sujet (version + convergence). Selon le paradigme « gap », la cible apparaissait 200 ms après l'extinction du point de fixation. La SMT était appliquée sur le CPF droit en synchronie avec l'apparition de la cible.

L'analyse porte sur la latence du mouvement oculaire, c'est-à-dire la durée ENTRE l'apparition de la cible et l'initiation du mouvement. Dans le cas du mouvement combiné, nous dérivons à partir des signaux relatifs à chaque œil (gauche et droit) deux signaux artificiels permettant d'une part l'analyse de la composante dite « conjuguée » ou de version (moyenne des deux signaux), d'autre part l'analyse de la composante dite « non conjuguée » ou de vergence (différence entre les deux signaux).

Un des résultats intéressants concernant la composante de version est qu'en condition de mouvement oculaire simple (saccade pure vers la gauche ou la droite), la SMT du CPF droit réduit de manière significative la latence de la saccade controlatérale à la SMT ( $-32,7$  ms en moyenne), alors qu'elle n'influence celle de la saccade ipsilatérale. Cette diminution moyenne de la latence est le fait d'une recrudescence des mouvements à latence courte (80-120 ms). L'interprétation retenue est que la SMT abolirait transitoirement l'inhibition directe exercée par le CPF sur les colliculi supérieurs. Plus innovant est le résultat observé en condition de mouvement combiné. En effet, dans le mouvement combiné (version + vergence), la SMT réduit également significativement la latence de la composante conjuguée (de version) dans les mouvements controlatéraux, alors qu'elle n'influence pas la latence de la composante conjuguée du mouvement ipsilatéral. Cet effet significatif controlatéral à la SMT vaut, en condition combinée, la moitié de l'effet obtenu en condition simple ( $-14,5$  ms en moyenne).

Ce résultat préliminaire encourage fortement l'hypothèse selon laquelle le CPF exercerait un rôle de contrôle inhibiteur similaire dans le mouvement saccadique, quelque soit sa forme (mouvements isolés ou combinés) ; toutefois, la grandeur de l'effet est différente, et cela fournit des informations nouvelles sur la manière dont le SNC contrôle les mouvements combinés, notamment en co-activant deux sous-systèmes oculomoteurs (saccade et vergence) ; ces systèmes seraient distincts au plan pré-moteur mais partiellement influencés par les conditions de fixation. La latence de la saccade combinée étant naturellement plus longue et, peut-être moins réflexive, que celle de la saccade isolée, la SMT a un effet plus faible.

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

#### 3.1. RÔLE DE LA GRAVITÉ DANS LA COORDINATION VISUO-MOTRICE

J. MCINTYRE, M. ZAOUÏ, A. BERTHOZ, en collaboration avec M. LIPSHITS (IPPI, Russian Academy of Science, Moscou, Russie)

Le SNC humain peut identifier la direction et l'intensité de la gravité par plusieurs moyens : les indices visuels (murs, sources de lumière, etc.) les otolithes du système vestibulaire, l'effet du poids des segments corporels sur la proprioception. Howard (1982) a proposé que l'axe vertical, défini à la fois par l'action de la gravité sur le corps et par des indices visuels, puisse servir à aligner les différents systèmes de coordonnées utilisés par le SNC. En effet, les sujets humains sont plus aptes à identifier la direction d'un stimulus horizontal ou vertical que de préciser la direction dans un sens oblique.

Nous avons étudié ce phénomène avec le manche à retour d'effort ROBOTOP et le poste expérimental COGNILAB développé pour l'étude des processus cognitifs en apesanteur. Avec ce dispositif, nous avons présenté aux sujets des stimuli à plusieurs orientations dans le plan fronto-parallèle. Pour la comparaison de deux traits présentés l'un après l'autre sur un écran vidéo, les sujets semblent utiliser un référentiel lié à la fois à l'axe du corps et à direction de la gravité. Ceci est mis en évidence par la modification des patterns de réponse évoqués par l'inclination du corps du sujet lors de l'expérience. Néanmoins, lorsque les sujets ont effectué cette tâche en apesanteur, l'effet d'oblique observé au sol s'est maintenu dans leurs réponses. Il semble donc que le SNC peut substituer un repère stable donné par la station orbitale quand les informations gravito-inertielles sont manquantes. Nous continuons cette ligne de recherche avec une expérience à bord de la station orbitale internationale pour laquelle on va couper le lien stable entre le cosmonaute et la station (sujet en « free-floating ») pour voir si le repère donné par la station est essentiel pour le SNC.

Un effet semblable a été mis en évidence pour le transfert d'informations entre le système visuel et le système haptique. Le sujet sentait l'orientation d'un couloir virtuel simulé par le manche à retour d'effort et devait réorienter un trait sur l'écran afin de le mettre en correspondance avec l'orientation du stimulus haptique. Dans ces conditions, nous avons constaté aussi un effet d'oblique car les réponses sont moins variables pour les stimuli horizontaux et verticaux que pour les orientations obliques. Dans une autre partie de l'expérience, nous avons demandé aux sujets d'aligner un trait sur l'écran avec l'axe perçu de la gravité (l'axe « vertical ») quelle que soit l'orientation de son corps. Des biais dans ces réponses sont corrélés avec les biais des réponses pour la tâche visuo-haptique décrits ci-dessus. Ceci indique que le SNC utilise la perception multi-modale de l'axe vertical comme référentiel lors du transfert d'informations entre les systèmes visuel et proprioceptif.

### 3.2. PROCESSUS PRÉDICTIFS POUR L'ANTICIPATION ET L'INTERCEPTION

J. MCINTYRE, P. PRÉVOST, P. SENOT, M. ZAOUÏ, A. BERTHOZ. En collaboration avec F. LACQUANITI et M. ZAGO (Institut Scientifique Santa Lucia, Rome) et B. RENAULT (Hôpital de la Salpêtrière)

Lorsqu'on attrape un objet en chute libre, le cerveau réussit à faire une prédiction sur le temps que mettra la balle pour atteindre la main. Lacquaniti et Maioli (1989) ont montré que cette prédiction se caractérise non seulement par une activation anticipée (environ 100 ms avant l'impact) des signaux recueillis par EMG de surface sur les muscles fléchisseurs du coude et mais aussi par une intensité d'activation proportionnelle à l'impact de la balle dans la main. Plus le point de départ de la balle est haut, plus l'intensité de l'activité musculaire sera importante. Nous avons étudié ces mécanismes d'anticipation à plusieurs niveaux. Ces études portent sur les questions suivantes : Lorsqu'on attrape des objets, le système nerveux central peut-il estimer le temps de contact en utilisant des estimations visuelles d'accélération ou en faisant une supposition a priori sur la direction de l'accélération gravitationnelle ? Dans quel repère s'effectuent les estimations de la trajectoire ? Quelles informations interviennent dans l'estimation de l'énergie de l'impact entre l'objet et la main ?

#### 3.2.1. *Anticipation de l'énergie de l'impact*

Afin de vérifier si le SNC fait une prédiction à partir d'informations préalables au lancer (la hauteur) ou d'informations issues de la chute de la balle elle-même (estimation de la vitesse ou de l'accélération instantanée), nous avons repris le protocole de Lacquaniti et Maioli avec un nouveau matériel expérimental. Six sujets ont attrapé une balle projetée vers le bas par un canon dont l'ouverture se trouvait à 1,6 m environ de la main des sujets. La projection se faisait avec différentes vitesses initiales (1, 2 et 3 m/s). L'activité musculaire anticipée augmente avec la vitesse initiale de la balle. Puisque la hauteur de lâcher ne change pas, il semblerait que les informations visuelles au cours de la chute soient utilisées dans cette tâche. Néanmoins, l'amplitude de l'activité musculaire était mieux corrélée avec la vitesse initiale de la balle qu'avec sa vitesse finale, en contraste avec les résultats observés par Lacquaniti pour les chutes de différentes hauteurs. Ceci suggère que la prédiction de l'amplitude de l'impact se repose sur une estimation approximative basée sur la perception de la vitesse initiale de la balle.

#### 3.2.2. *Modèles internes pour l'anticipation du temps d'impact*

La précision avec laquelle le SNC peut prévoir le moment de contact avec une balle en chute libre montre que l'accélération de la balle est bien prise en compte lors des calculs du temps avant contact (TC). Mais le système visuel est peu sensible aux accélérations des objets dans le champ visuel. Nous faisons l'hypothèse que l'intégration des informations visuelles est couplée aux informations gravitationnelles au sein d'un *modèle interne* permettant ainsi de mieux

anticiper TC. Nous avons étudié ces modèles au sol et en microgravité avec une tâche de saisie d'une balle en phase balistique et avec des objets mus ayant des accélérations variables. Les décalages des réponses musculaires anticipées en fonction du profil d'accélération et de la présence de la gravité montrent que l'anticipation de TC s'effectue par des modèles internes simplifiés ( $TC = \text{distance}/\text{vitesse}$ ) lorsque la loi de mouvement du système mécanique à attraper est inconnue (un système pendulaire avec contrepois caché), mais que le SNC peut faire appel à un modèle interne de la gravité afin de mieux estimer le TC pour un objet en chute libre. Nous poursuivons ces expériences sur les modèles internes, notamment par une nouvelle approche, celle de l'imagerie fonctionnelle par EEG et MEG.

### 3.2.3. *Stratégies de contrôle cinématique pour l'interception*

Pour réussir une tâche d'interception, on doit transporter la main au bon endroit et au bon moment afin d'attraper l'objet dans les meilleures conditions. On peut envisager deux stratégies : soit essayer d'*ajuster* la vitesse de la main en fonction de celle de l'objet (contrôle rétroactif), soit essayer de *prévoir* l'endroit où se trouvera l'objet à un moment donné et transporter directement la main à cet endroit (contrôle prédictif). Nous avons exploré la capacité des sujets humains à réaliser une tâche d'attraper un objet en chute libre et nous avons comparé le comportement chez l'homme avec des stratégies de contrôle formulées par des roboticiens. Les sujets devaient attraper une barre longue de 10 cm. Lors de la chute, la vitesse de la main n'était pas ajustée à celle de la cible. Les sujets semblaient faire une estimation d'une position future de la barre et programmer directement le transport de leur main vers cette position, ce qui confirme notre deuxième hypothèse (contrôle prédictif). Néanmoins, lorsque la barre est lâchée d'une hauteur de 2 m, les sujets initient généralement le mouvement de leur main vers le haut pour diriger ensuite leur main dans le sens du mouvement de la cible avant de l'attraper. Ceci est proche de la stratégie employée par les robots pour réduire l'énergie de l'impact lors de la saisie de l'objet.

### 3.3. <sup>^</sup>CONTRÔLE DE LA FORCE ET DE L'IMPÉDANCE

J. MCINTYRE, A. BERTHOZ. En collaboration avec J.-J. SLOTINE (MIT Cambridge, MA, USA) et M. LIPSHITS (IPPI, Russian Academy of Science, Moscou, Russie)

Un grand nombre de tâches manuelles implique un contact entre la main et un objet dans l'environnement. Par exemple, quand la tâche est d'essuyer une vitrine, la main doit glisser le torchon sur la surface de la vitre tout en restant en contact avec cette surface, et tout en y appliquant une force modérée. Deux stratégies principales existent pour la production d'un tel mouvement. Dans le premier cas, le système de contrôle possède un modèle géométrique de la surface à suivre. Le système engendre une commande motrice chargée de produire un mouvement qui suivra la surface modélisée en appliquant le niveau de force

voulu. Cette stratégie proactive peut être valide dans la limite de la précision du modèle par rapport à la surface réelle. Ceci est en contraste avec la deuxième stratégie de contrôle, celle d'un rétrocontrôle des forces perpendiculaires à la surface, qui nécessite la capacité de mesurer les forces de contact en temps réel pendant le mouvement. Le rétrocontrôle semble présenter un grand avantage par rapport au contrôle proactif, car les écarts éventuels entre le modèle interne de la surface et la surface réelle sont pris en compte automatiquement par la stratégie de contrôle. En revanche, les délais de transmissions des mesures de force tels qu'on en trouve dans le système nerveux posent d'énormes difficultés pour le maintien de la stabilité lors de ce type de contrôle.

Nous avons demandé aux sujets de suivre une surface simulée par les limites de déplacements du manche ROBOTOP. Sans prévenir, nous avons légèrement réorienté la surface et mesuré la variation des forces de la main à la suite de ces perturbations. La variation systématique des forces selon la direction de rotation montre que le mouvement n'est pas géré par un rétrocontrôle en force, au moins pour les délais courts. Une grande partie de cet effet peut être attribué aux caractéristiques passives du système mécanique. Mais d'autres aspects des résultats suggèrent la présence d'un rétrocontrôle tardif de la force de contact, malgré des retards important dans les circuits musculospinaux et corticospinaux. Des théories récentes dans le domaine de la robotique montrent comment de tels délais peuvent être surmontés en utilisant une stratégie de contrôle par variable d'onde. Nous envisageons des études de psychophysiques afin de mettre en évidence l'utilisation d'une telle stratégie de contrôle chez l'homme.

#### 4. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME VISUEL

C. MILLERET, N. ROCHEFORT, L. WATROBA, N. QUENECH'DU. En collaboration avec M. MALLAT (INSERM, U134, Lab. de Biologie des Interactions Neurones/Glie, Hôpital de la Salpêtrière, Paris) et avec C. GIAUME (Lab. de Neuropharmacologie, Collège de France, Paris)

Le développement des connexions visuelles calleuses est dépendant de l'expérience visuelle postnatale. Chez les chatons élevés avec une expérience visuelle normale (groupe EN), il est caractérisé par une élimination massive des exubérances juvéniles calleuses visuelles. Chez les chatons élevés avec une expérience visuelle monoculaire (groupe MO), il se caractérise au contraire par une stabilisation de ces exubérances. Ce modèle *in vivo* a été utilisé pour rechercher des indices en faveur d'un rôle différentiel des cellules microgliales et des astrocytes sur ces exubérances selon l'expérience visuelle. Pour cela, nous avons étudié la distribution et les caractéristiques morphologiques de ces 2 populations de cellules gliales dans les aires visuelles corticales 17 et 18 et dans la substance blanche sous-jacente chez des chats EN et MO, âgés de 15 jours, 1 mois, 2 mois et adultes.

Le marquage des cellules microgliales par l'isolectine-B4 a mis en évidence la présence d'un amas sous cortical de ces cellules, situé sur le trajet des fibres calleuses, chez tous les chats EN ou MO. A l'âge de 15 jours et de 1 mois, la morphologie prédominante des cellules de cet amas variait significativement dans les 2 conditions expérimentales : chez les animaux EN, les cellules microgliales amiboïdes et peu ramifiées étaient largement majoritaires alors que chez les animaux MO, la proportion des cellules ramifiées était significativement plus importante. La nature de l'expérience visuelle postnatale module donc la morphologie de ces cellules. Or, ces changements morphologiques reflètent des changements d'activité : sous une forme amiboïde, ces cellules ont entre autres une activité macrophagique notamment sur les fibres calleuses alors que, sous une forme ramifiée (mais non quiescente), elles sécrètent des facteurs de croissance. Les cellules microgliales amiboïdes présentes chez les animaux EN participent donc à l'élimination des exubérances juvéniles calleuses par phagocytose. Chez les animaux MO, ces mêmes cellules sous une forme ramifiée pourraient au contraire participer à leur stabilisation. Au-delà de cet âge, ces cellules microgliales ne sont pas affectées par l'expérience visuelle postnatale et ne semblent donc plus impliquées dans le développement des connexions calleuses.

Le marquage immunohistochimique des astrocytes par identification de la GFAP et celui des connexines qui les relie (Cx43 et Cx30) ont également mis en évidence des changements significatifs de leurs distributions respectives au cours du développement dans nos 2 conditions expérimentales (EN et MO). En effet, jusqu'à l'âge de 1 mois, les astrocytes et la Cx43 sont presque exclusivement localisés dans la substance blanche puis ils disparaissent progressivement de cette région avec l'âge. Parallèlement, le nombre d'astrocytes et celui des Cx43 et 30 augmentent dans le cortex mais un net retard de cette apparition est observé chez les chatons MO. Ce retard coïncide avec celui observé électrophysiologiquement dans la mise en place des connexions calleuses chez les chats MO et suppose donc l'existence d'interactions réciproques entre les fibres calleuses visuelles et les astrocytes au cours du développement du chaton, dépendantes de l'expérience visuelle.

En conséquence, la nature de l'expérience visuelle modifierait entre autres les interactions entre les neurones calleux visuels et les cellules gliales (microglie et astrocytes). De ce fait, il est raisonnable de supposer que ces 2 populations gliales sont impliquées dans l'élaboration et la restructuration des cartes corticales calleuses visuelles.

## 5. PERCEPTION ACTIVE ET MANIPULATION D'OBJETS

### 5.1. PERCEPTION DES PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES DES SURFACES

J. DROULEZ, M. PANERAI, M. WEXLER, Y. LAMOURET

Les propriétés géométriques des surfaces : orientation (tilt et slant), distance à l'observateur et forme tridimensionnelle (courbures) sont reconstruites à partir

de plusieurs indices : mouvement, texture, perspective linéaire, stéréoscopie, couplage avec les mouvements d l'observateur. Nous nous intéressons plus particulièrement aux mécanismes d'extraction de ces propriétés géométriques à partir de ces divers indices visuels et extra-visuels et aux différents modes d'interaction (sélection, combinaison, résolution de contraintes). La poursuite de la collaboration avec le centre d'imagerie fonctionnelle du SHFJ et le démarrage du projet MEG devraient nous permettre d'avancer dans la compréhension de la dynamique de ces processus. Dans le cadre d'une coopération avec l'Université de Singapour et l'INRIA, nous examinons les hypothèses de stratification du traitement des informations visuelles.

Parmi les résultats les plus marquants, nous avons montré la contribution significative des déplacements actifs de l'observateur dans la perception des distances absolues des objets et dans la perception de l'orientation des surfaces.

Chez un observateur immobile, la distance des objets peut être évaluée à partir d'un grand nombre d'indices visuels mono ou binoculaires. En utilisant des images de synthèse, il est possible de supprimer artificiellement la contribution de tous ces indices à l'exception du seul flux optique, c'est-à-dire de la distribution spatiale et temporelle des vitesses apparentes. Dans ces conditions, les sujets immobiles peuvent encore ordonner les distances des objets en se fondant sur l'amplitude de leurs mouvements relatifs. Cependant, en restreignant l'analyse aux seuls essais effectués à vitesse apparente constante, les réponses des sujets immobiles ne sont plus corrélées à la distance réelle. Au contraire, lorsque le flux optique est produit par le déplacement actif des sujets, leurs réponses sont à nouveau corrélées à la distance réelle. Ces résultats démontrent la contribution des informations extra-visuelles à la calibration des indices visuels de distance (Panerai *et al.*, 2001, Fah *et al.*, 2001).

En utilisant également des images de synthèse en trompe-l'œil, nous avons montré que les contributions respectives des indices statiques (notamment la perspective linéaire) et cinématiques (l'analyse du flux optique) étaient modifiées chez un observateur en déplacement actif. Alors que la perspective linéaire l'emporte généralement sur le mouvement chez un observateur immobile, le mouvement prédomine chez un observateur en déplacement actif. Une expérience de contrôle a également montré que ce n'est pas le simple fait de se déplacer qui modifie les poids RESPECTIFS des indices statiques et cinématiques, mais bien l'existence d'un couplage entre L'ACTION DU sujet et les modifications subséquentes de la scène visuelle. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse selon laquelle la contrainte de stationnarité des objets dominerait la contrainte de régularité, elle-même plus importante que la contrainte de rigidité. Ils conduisent donc à une révision profonde de la conception traditionnelle de la perception des formes à partir du mouvement qui privilégiait la contrainte de rigidité (Wexler *et al.*, 2001a, 2001b).



Les mécanismes locaux de détection du mouvement ne mesurent qu'une seule composante de vitesse, le long du vecteur contraste. L'estimation complète du champ de vitesse suppose donc la résolution du « problème de l'ouverture », par intégration spatiale des mesures locales. Selon les modèles classiques, la vitesse résulterait d'un lissage bidimensionnel. Nous avons proposé l'utilisation d'une contrainte tridimensionnelle portant sur la variation spatiale du vecteur vitesse de l'objet, et montré que cette méthode présente plusieurs avantages théoriques. Nous avons testé expérimentalement l'hypothèse de contrainte tridimensionnelle et nous avons comparé les effets de la forme, de la taille et de la distance des fenêtres de visualisation sur les mécanismes d'intégration du mouvement. Les résultats obtenus montrent en outre que l'intégration spatiale se produit même lorsque la vitesse n'est pas uniforme, mais requiert la cohérence des informations de mouvement pour être effective. Elle intervient donc en coopération avec un mécanisme de sélection des informations de mouvement (Lamouret *et al.*, 2001).

#### 5.1.1. Construction de l'objet perçu

J. DROULEZ, A.L. PARADIS (en collaboration avec le (CAFJ) CEA à Orsay)

Dans cet axe de recherche, nous étudions les mécanismes qui permettent au cerveau d'organiser la perception en entités cohérentes appelées « objets perçus ». La distinction de plusieurs entités cohérentes dans un flux sensoriel (visuel par exemple) s'effectue sur la base de l'observation de discontinuités (dans le mouvement, la texture, etc.) selon des mécanismes pré-attentifs. Mais la segmentation de la scène visuelle est également conditionnée par la tâche réalisée par le sujet (mécanisme attentionnel, utilisation de variables d'attribution et de propriétés non directement observables telles que l'identité des objets).

L'exploration par IRM fonctionnelle de la perception visuelle des formes tridimensionnelles à partir du mouvement nous a permis de délimiter les principales aires corticales impliquées dans l'analyse du mouvement visuel et de son utilisation dans la perception des formes. Ce travail se situe dans le cadre d'une collaboration avec le Service Hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ) du CEA à Orsay. Une 1<sup>re</sup> étude de groupe portant sur 9 sujets sains nous a permis de situer les aires corticales activées par :

- la présence d'un mouvement visuel stochastique,
- la présence d'un mouvement cohérent dépourvu d'information sur la forme 3D,
- la présence d'un mouvement cohérent induisant la perception d'une forme 3D.

Les 3 types de mouvements produisent des activations similaires dans le complexe MT (V5) bilatéral et dans le cortex visuel primaire. Le gyrus occipital supérieur (V3 dorsale) et la jonction pariéto-occipitale sont plus activés lors de la présentation d'un mouvement cohérent. Enfin, la jonction occipito-temporale semble jouer un rôle spécifique dans la perception des formes 3D à partir du mouvement (Paradis *et al.*, 2000).

Une 2<sup>e</sup> étude a eu pour objet les effets de l'attention portée par les sujets sur l'activation de ces aires. Dans cette expérience, les sujets sont soumis à un seul type de stimulation visuelle, mais nous leur demandons de porter leur attention sur les variations soit de couleur, soit de mouvement, soit de forme 3D. Les premiers résultats de cette étude ont été publiés dans le manuscrit de thèse soutenue par Anne-Lise Paradis.

### 5.1.2. *Contrôle du mouvement*

D. TOFFIN, J. DROULEZ (en collaboration avec J.-J. SLOTINE, S. HANNETON, A. KEMENY et J. MCINTYRE)

Dans cet axe de recherche, nous étudions les mécanismes qui permettent de contrôler les mouvements tri-dimensionnels complexes, tant du point de vue de leur géométrie que de leurs caractéristiques dynamiques.

À l'aide du dispositif Robotop — un manche à balai robotisé, développé dans le cadre des expérimentations spatiales — nous avons étudié la contribution du retour d'effort (informations haptiques) et des indices visuels permettant une anticipation dans une tâche de poursuite visuo-manuelle nécessitant le contrôle des mouvements d'un objet possédant une dynamique propre. Cette étude nous a permis de mettre en évidence un couplage positif entre l'anticipation et l'utilisation du retour d'effort par les sujets, COUPLAGE QUI NOUS SEMBLE EN FAVEUR DE l'existence de modèles internes prédictifs de la dynamique de l'objet manipulé. L'étude des stratégies de contrôle des sujets a montré que deux schémas de commande semblent coexister : un système de poursuite lente produisant une commande intégrant une grande partie des propriétés dynamiques de l'objet manipulé et un système de corrections rapides, de type balistique, dont le déclenchement se ferait sous le contrôle d'une variable composite, combinaison de l'erreur visuelle et de ses dérivées successives. Ces conclusions sont en faveur d'une analogie très forte avec le contrôle des mouvements des yeux et trouvent un support théorique appréciable dans la théorie du contrôle des systèmes non linéaires par surface glissante (sliding control). Dans ce cadre, le rôle des mouvements stéréotypés de type saccadique serait d'assurer la stabilité du contrôle malgré les imprécisions de la représentation interne de la dynamique.

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

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

L'utilisation des techniques de Réalité Virtuelle (RV) est de plus en plus répandue aussi bien pour les études scientifiques que pour les applications industrielles. Au-delà de l'utilisation de ces dispositifs comme moyens de manipulation, la notion de l'*immersion* s'avère centrale, en particulier celle du corps propre de l'utilisateur dans la réalité (spatio-temporelle) simulée.

La perception de cette réalité par un sujet manipulant des objets virtuels est fonction de la qualité de la restitution des *stimuli visuels* (indices de profondeur, flux optique, ...) ou sonores, mais aussi de l'*intégration des actions* du sujet au sens de Gibson. Pour les prendre en compte, au-delà de la visualisation du corps propre du sujet, son immersion doit être effectuée, notamment par la génération des stimuli haptiques et kinesthésiques.

Cette notion d'immersion, encore peu étudiée de manière scientifique, mérite d'être analysée suivant une méthodologie rigoureuse, ce d'autant que la validation et l'*acceptabilité* des dispositifs de RV en dépendent fortement.

### 6.1. INTÉGRATION SENSORI-MOTRICE DANS UN SIMULATEUR DE CONDUITE : CONTRIBUTIONS DE LA RESTITUTION DU MOUVEMENT À LA RÉALISATION DES TÂCHES ÉLÉMENTAIRES DE CONDUITE

I. SIEGLER (LPPA), G. REYMOND (LPPA/Renault), M. ZAOUI (LPPA),  
J. DROULEZ (LPPA), A. KEMENY (Renault), A. BERTHOZ (LPPA)

Dans le cadre du projet européen CARDS (Eureka n° 1924) (Comprehensive Automobile Research and Development Simulator) une coopération de recherche est menée avec des partenaires industriels et académiques pour étudier et concevoir un simulateur de conduite à des fins de recherches et développements. Ce simulateur sera équipé d'un casque de réalité virtuelle à large champ de vision, à haute résolution et à temps de réponse effectif réduit, d'une plate-forme mobile à 6 axes ainsi que d'un siège mobile électromagnétique à haute fréquence. Le LPPA a pour mission de mener l'étude et l'évaluation scientifique de l'intégration visuelle et proprioceptive à travers des protocoles expérimentaux.

Une série d'expérience a été menée dans le but de déterminer dans quelle mesure les informations kinesthésiques fournies par la plate-forme mobile procurent au conducteur une meilleure perception du mouvement du véhicule (par rapport à un simulateur statique) et influencent la réalisation de manœuvres de conduite élémentaires, notamment le freinage, le changement de file et la négociation d'un tournant à une intersection.

Dans l'expérience concernant la performance en freinage, il était demandé aux sujets de réaliser successivement plusieurs freinages jusqu'à l'arrêt du véhicule près d'un panneau routier. Par ces expériences, il a pu être montré que la présence des informations de mouvement données par la plate-forme mobile permet aux

conducteurs de freiner de façon plus réaliste qu'en configuration de simulateur statique. On observe qu'en l'absence de perception proprioceptive de la décélération, les sujets en viennent rapidement à réaliser des freinages de types « freinages d'urgence ». Leur modèle interne de la dynamique du véhicule est perturbé par le conflit majeur que constitue l'absence des signaux proprioceptifs.

Pour étudier le rôle de la proprioception lors de la prise d'un virage à une intersection, il était demandé aux sujets de tourner deux fois autour d'un pâté de maison dans un environnement urbain, et ce, dans quatre conditions de restitution de mouvement. Nous avons comparé le contrôle de trajectoire selon que la plate-forme restituait le mouvement dans toutes les directions, aucune, seulement les informations latérales ou longitudinales. Les résultats montrent que la présence des informations latérales a une influence significative sur le comportement du conducteur dans le virage, celui-ci prenant en moyenne le virage moins « serré » quand ces informations sont présentes. Ces résultats devront être mis en relation avec les mouvements effectifs de la plate-forme dans les différentes conditions.

## 6.2. VISION ACTIVE D'OBJETS TRIDIMENSIONNELS TEXTURÉS EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

M. VALLET, J. DROULEZ, A. KEMENY

Les textures sont à l'origine d'un indice de perception de profondeur appelé « gradient de texture » par Gibson : il est fréquent de pouvoir décrire une surface réelle à partir d'éléments de texture, de taille et de forme semblables ; Leur projection sur la rétine permet alors de déterminer l'inclinaison et la profondeur locale de cette surface.

Nous cherchons à caractériser mathématiquement les informations de gradient et à étudier leur corrélation avec d'autres indices monoculaires de profondeur, comme la perspective, la parallaxe et l'éclaircissement. Notre objectif est de mieux comprendre les phases de la perception visuelle liées aux textures (segmentation en régions, reconstruction de surfaces dans l'espace). Nous étudions ainsi comment anticiper certains conflits sensoriels, fréquents en environnement virtuel, en présence de surfaces texturées.

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

D. PAILLE, A. KEMENY, A. BERTHOZ

Les technologies de réalité virtuelle permettent une visualisation interactive et immersive 3D en temps réel de la géométrie, de la couleur. L'expérience montre que la perception des distances est perturbée lors de l'observation d'une scène virtuelle par un observateur statique ou dynamique. En effet, dans un environnement virtuel, la sensation de profondeur est basée sur les disparités géométriques

entre les deux projections rétiniennes ou sur l'accommodation, la perspective linéaire ou encore sur la parallaxe de mouvement, le champ de vision recréé et encore d'autres indices. Dans la reconstruction de l'espace, lorsque ces indices entrent en conflit avec la disparité, l'observateur perçoit des « erreurs » dans l'espace virtuel qui influencent, entre autre, la perception des distances (Howard et Rogers, 1995).

Afin de mieux comprendre ces « illusions perceptives », les interactions entre la convergence, la parallaxe et la taille du champ de vision sont à l'étude. Elles seront complétées par des expérimentations visio-haptiques pour prendre en compte des sensations d'immersion plus complètes en environnement virtuel.

#### 6.4. CONTRIBUTION DU RETOUR D'EFFORT AU CONTRÔLE SENSORI-MOTEUR ET À L'APPRENTISSAGE DE MODÈLE INTERNE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES D. TOFFIN, A. KEMENY, J. DROULEZ, J. MCINTYRE

Le thème de recherche porte sur l'étude de systèmes dynamiques complexes en particulier, sur la contribution du retour d'effort au contrôle sensori-moteur et à l'apprentissage de modèle interne des systèmes dynamiques. Cette étude entraîne la mise en œuvre de stratégies anticipatrices adaptées aux capacités neuromusculaires et au système dynamique.

L'étude et l'intégration de systèmes à retour d'effort appliqués à des personnes immergées dans un environnement virtuel doivent apporter à celles-ci des informations complémentaires, que le visuel ne peut leur apporter, sur leurs représentations dans cet espace mais aussi la possibilité de modifier activement l'environnement dans lequel il se trouve (manipulation, déformation et utilisation d'objet). Cette étude doit répondre aux problèmes d'intégration d'informations visio-haptiques liées à l'utilisation de système à retour d'effort dans un environnement virtuel.

Pour cela, une des premières étapes de ce travail de thèse, correspondant aux problèmes purement haptiques, a été l'étude de la perception et de la reproduction d'une force. Cette étude réalisée sur le manche à retour d'effort du laboratoire : ROBOTOP, a permis de valider qu'il n'apparaissait aucune direction privilégiée dans la reproduction de la direction d'une force contrairement au système visuel où des directions privilégiées apparaissent.

Par la suite, cette étude devrait être complétée par une expérimentation sur la reproduction de la direction et de l'amplitude d'une force, afin de mieux comprendre l'intégration de signaux correspondant à une activité musculaire.

## 7. PERCEPTION DES OBJETS ET DU MOUVEMENT

### 7.1. SÉLECTION DES INFORMATIONS IDIOTHÉTIQUES ET TEMPORELLES

#### DANS L'ORIENTATION SPATIALE

I. ISRAËL. En collaboration avec D. MERFELD, L. ZUPAN (Jenks Vestibular Physiology Laboratory, MEEI, Boston, USA)

#### 7.1.1. *Avec l'utilisation de la centrifugeuse du Jenks Vestibular Physiology laboratory*

Avec la centrifugeuse du Jenks Vestibular Physiology Laboratory, j'ai pu mener deux expériences de perception vestibulaire pour répondre à certaines questions auxquelles le matériel de Paris, pourtant particulièrement sophistiqué, ne me permettait pas de répondre.

Effet de la stimulation des otolithes et du temps sur la perception d'angles passivement parcourus dans le noir.

Nous avons examiné l'influence du temps sur le traitement central des signaux otolithiques dans un contexte d'orientation spatiale. En pilotant la centrifugeuse à l'aide d'un levier de vitesse, des sujets sains ont reproduit l'angle de rotations précédemment parcourues de manière passive, dans le noir. La durée des rotations était variable (proportionnelle à l'angle parcouru) ou bien constante (9 s). Les rotations étaient soit sur place (ON-center), soit excentrées avec accélération centripète inter-aurale (OFF-center). Les résultats présentés sont préliminaires.

Quand la durée du stimulus est variable, les sujets reproduisent très bien l'angle précédemment parcouru pour les deux conditions ON et OFF-center. Quand la durée du stimulus est constante, l'amplitude angulaire moyenne des réponses est bien reproduite en ON-center, alors qu'elle est trop grande en OFF-center. En examinant les stratégies utilisées, on remarque que la durée du stimulus est mieux reproduite lorsqu'elle est variable que lorsqu'elle est constante, pour les deux conditions ON et OFF-center. Quand la durée du stimulus est constante, elle est davantage surestimée en OFF- qu'en ON-center. De plus, pour un stimulus à durée variable, la vitesse angulaire maximale de la réponse est sous-estimée par rapport à celle du stimulus, alors qu'elle est bien reproduite pour un stimulus à durée constante (mais avec une plus grande variabilité). Le dépassement de l'angle observé en OFF-center semble donc provenir d'une surestimation de la durée plutôt que d'une surestimation de la vitesse du stimulus.

Deux explications peuvent être proposées pour ces résultats : au cours de mouvements passifs bi-dimensionnels, la stimulation otolithique (accélération centripète inter-aurale) supplémentaire empêche les sujets de choisir les informations pertinentes pour reproduire une rotation ou alors elle perturbe directement la perception du temps.

### 7.1.2. *Perception du rayon d'un arc de cercle passivement parcouru (perception de différence)*

Le rôle des systèmes vestibulaire et somato-sensoriel a été étudié, dans le cadre de l'orientation spatiale en 2D chez l'homme. Nous avons précédemment montré que les otolithes n'interfèrent pas avec les canaux semi-circulaires pour l'estimation de l'angle d'un arc de cercle passivement parcouru dans le noir, puisque qu'il n'y a pas de différence entre les rotations ON- et OFF-center dans cette estimation d'angle. Nous avons donc examiné l'estimation d'une composante linéaire du cercle : son rayon. Les résultats préliminaires suggèrent que alors que la discrimination entre des rotations ON- et OFF-center suit la même règle que la perception du mouvement rectiligne, c'est à dire obéit au même seuil de vitesse linéaire, la discrimination entre différents rayons implique apparemment plus d'informations somato-sensorielles et présente plus de variabilité/idiosyncrasie.

## 8. ÉTUDES DES BASES NEUROSENSORIELLES DE LA NAVIGATION CHEZ L'ANIMAL

M.B. ZUGARO, C. CHARRON, A. ARLEO, L. RONDI-REIG, P. MARTIN, A. BERTHOZ, S. WIENER

### 8.1. ENREGISTREMENTS DE CELLULES HIPPOCAMPIQUES CHEZ LE JEUNE RAT

#### 8.1.1. *Ontogenèse de réponses hippocampiques spatiales chez le jeune rat* P. MARTIN, A. BERTHOZ

Dans ce projet, nous avons enregistré des neurones hippocampiques chez des rats âgés de quelques semaines à deux mois. Chez des rats âgés de moins de 28 jours, des cellules montrent très peu de sélectivité spatiale mais, dès l'âge de 28 jours, certains neurones ont des décharges spatiales de basse résolution (grands champs d'activité).

#### 8.1.2. *Étude de l'ontogenèse des capacités de navigation : Enregistrements de décharges de neurones au niveau de l'hippocampe*

P. MARTIN, A. BERTHOZ

O'Keefe et Dostrovsky (1971) ont été les premiers à montrer des cellules hippocampiques ayant des « champs d'activité », c'est-à-dire que les neurones déchargeaient lorsque le rat occupait une région circonscrite de l'environnement, mais étaient silencieux ailleurs. L'hippocampe est aussi l'une des dernières régions du cerveau à terminer son développement, Altman et Das, (1965) ; Bayer (1980) et Schenk (1985) ont montré des déficits de navigation chez des rats âgés de 21 et 28 jours, mais les rats de 35 jours avaient les mêmes niveaux de performance que les adultes. Dans une autre étude avec le labyrinthe d'eau, Rudy *et col.* (1987) ont montré que des rats âgés de 17 jours ne pouvaient pas utiliser

des repères distants de l'environnement et que les rats de 20 jours ne montraient que des évidences faibles d'utilisation de ces repères.

Nous avons effectué des enregistrements hippocampiques chez 9 rats, âgés de 27 à 112 jours. Chez les rats de moins de 45 jours, des enregistrements de neurones pyramidaux hippocampiques ont montré une sélectivité spatiale moins précise que chez le rat adulte, et avec un taux d'activité spontané très élevé. Après le 45<sup>e</sup> jour, le taux de décharge spontané a baissé, et l'activité cellulaire est très spécifique pour une petite région de l'environnement, identique à celle trouvée chez l'adulte. L'ontogenèse des réponses spatiales précises suit alors la même course que celle des capacités d'orientation spatiale.

8.1.3. *Intégration des informations en provenance des repères de l'environnement et des mouvements propres au niveau des cellules sélectives de l'orientation de la tête*

M. ZUGARO, A. BERTHOZ, S. WIENER

Afin de mieux comprendre les processus de fusion multisensorielle pour les représentations spatiales, nous enregistrons l'activité des cellules sélectives pour l'orientation de la tête du noyau antérodorsal du thalamus chez le rat. Afin de mieux comprendre le rôle des mouvements actifs dans la génération et le maintien des réponses de cellules de DT, nous avons comparé les décharges de neurones DT chez le rat libre de ses mouvements pendant les rotations actives ou passives. Comme il y a une nette diminution d'activité au niveau des neurones DT du noyau antérodorsal du thalamus chez des rats sous contention, nous avons développé un nouveau dispositif où les rats sont entraînés à rester immobile lorsqu'ils sont tournés passivement. Les courbes de réponses des cellules DT avaient des formes très semblables pendant les rotations passives et actives, mais le taux maximal d'activité a baissé de 30 % pendant les rotations passives. Ceci montre que les mouvements volontaires contribuent de façon réelle à ce signal, alors que la direction préférée et la forme de la courbe de réponse restent inchangées. Les autres informations sensorielles sont donc suffisantes pour maintenir un signal de sélectivité directionnelle.

D'autres expériences étudiaient les types de repères qui influencent des cellules de direction. Cressant et ses collaborateurs (1997) ont montré que les objets tridimensionnels contrôlent les champs de décharge des cellules de lieu lorsqu'ils sont placés à la périphérie de l'environnement où évoluent les rats, mais perdent ce contrôle lorsqu'ils sont placés au centre. Comme les cellules de lieu et les cellules de direction de la tête sous-tendent des représentations spatiales cohérentes, nous avons testé si le contrôle des directions préférentielles des cellules de direction de la tête par les objets tridimensionnels dépend également de leur disposition spatiale (proche ou périphérique). Nous avons enregistré des cellules de direction de la tête du noyau antérodorsal du thalamus chez des rats se déplaçant librement dans un cylindre. Trois objets ont été placés contre la paroi, formant un triangle équilatéral. Les directions préférentielles ont été mesurées



avant et après rotation des objets d'un angle de 120°. Ces manipulations ont été ensuite répétées lorsque les parois du cylindre sont retirées, ce qui permettait aux rats de voir au loin les rideaux noirs qui tapissent la pièce.

Les objets tridimensionnels ne contrôlent les directions préférentielles que lorsque le cylindre est présent, c'est-à-dire lorsqu'ils constituent les repères les plus distants. Comme les objets les plus distants restent les plus stables lorsqu'on se déplace, il serait tout à fait raisonnable que les systèmes d'orientation aient évolué de façon à favoriser la sélection de ces repères plus distants.

## 9. LA NAVIGATION EN TROIS DIMENSIONS

### INFLUENCE DES CADRES DE RÉFÉRENCE SUR L'ACQUISITION DES INFORMATIONS SPATIALES DANS UN LABYRINTHE 3D

M. VIDAL, M.-A. AMORIM, A. BERTHOZ

L'étude de la navigation hors gravité est aujourd'hui cruciale pour comprendre les problèmes des spationautes et pour faciliter leurs déplacements dans les stations spatiales. La complexité des déplacements lors de la navigation en 3D provient des rotations possibles dans l'espace qui ne sont pas commutatives contrairement à la navigation en présence des contraintes gravitaires. Trois types de déplacements passifs en environnement virtuel ont été comparés : le type *apesanteur*, le type *plongée sous-marine* et le type *terrestre*. Chacun de ces modes de déplacement suggérant l'utilisation de cadres de référence plus ou moins proche de ceux habituellement rencontrés lors de la navigation en présence de la gravité. Les environnements étudiés sont constitués de couloirs 3D à angles droits de type station spatiale. Les résultats ont montré que la reconstruction en vue extérieure des couloirs dans lesquels ont navigué les sujets se fait : de plus en plus rapidement et correctement de la condition *apesanteur* à la condition *terrestre* ; et de plus en plus lentement et erronée lorsque le nombre de segments des couloirs augmente.

Ces résultats suggèrent que la construction d'une carte mentale de l'environnement 3D soit facilitée par la suggestion partielle ou non d'une verticale gravitaire lors du déplacement du point de vue, avec finalement une plus grande aisance lorsque les déplacements sont de type terrestre et correspondant à une fausse navigation 3D. Ces résultats s'avèrent utiles pour le choix du déplacement de la caméra lors de l'apprentissage en environnement virtuel d'une station spatiale par les cosmonautes.

Cette expérience a été sélectionnée par le CNES pour être envoyée sur la station spatiale internationale en octobre 2001, ceci afin que nos hypothèses sur l'influence de la gravité sur ces résultats soient vérifiées. Nous avons donc élaboré une version spéciale de l'expérience pour les cosmonautes.

## 10. EXPLORATION EN IRM FONCTIONNELLE DU CONTROLE CORTICAL DES SACCADÉS OCULAIRES

D. MILEA, E. LOBEL, A. BERTHOZ (en coopération avec C. PIERROT  
DESEILLIGNY, S. LEHÉRICY, S. RIVAUD, H. DUFFAU, Hôpital de la Salpêtrière)

### 10.1. CARTOGRAPHIE CÉRÉBRALE EN IRM FONCTIONNELLE DES AIRES CORTICALES PARIÉTALES IMPLIQUÉES DANS LES SACCADÉS OCULAIRES

La réalisation des saccades oculaires implique l'activation de plusieurs régions corticales : le champ oculomoteur frontal, le champ oculomoteur supplémentaire, dont les caractères anatomiques et fonctionnels sont relativement bien connus chez l'humain. En revanche, il existe peu d'informations sur la localisation précise des zones situées dans le lobe pariétal, notamment au sein du sillon intrapariétal. Le but de cette étude est de déterminer en IRM fonctionnelle les activations obtenues au sein du lobe pariétal lors de la réalisation des saccades volontaires endogènes, en lumière ambiante, chez une dizaine de volontaires sains.

Les premières données de cette étude suggèrent l'existence de plusieurs régions distinctes au sein du lobe pariétal : la partie antérieure du sillon intrapariétal, la partie postérieure du sillon intrapariétal et le précunéus dans la fissure interhémisphérique. Ces résultats font l'objet d'une présentation affichée qui sera présentée à la « Society for Neurosciences » à San Diego, en Californie en novembre 2001.

### 10.2. ÉTUDE EN IRMF ÉVÉNEMENTIELLE DES ACTIVATIONS CORTICALES LORS DES ÉTAPES SUCCESSIVES DE SÉLECTION, PRÉPARATION ET EXÉCUTION D'UNE SACCADÉ OCULAIRE HORIZONTALE

Ce projet a pour but de déterminer les activations corticales dans les phases de sélection, préparation et exécution de saccades oculaires horizontales visuellement guidées. La principale hypothèse est que les régions corticales activées lors de ces différentes étapes sont spécifiques, ce qui est connu par la littérature animale. Ainsi, la sélection et la préparation d'un mouvement devraient activer des régions plus antérieures du cortex (cortex préfrontal, préSMA, cortex prémoteur, ainsi que les noyaux gris connectés à ces structures), par rapport à sa réalisation motrice. Lors de cette étude qui a inclus pour le moment la moitié de la dizaine de volontaires sains prévus, il sera également tenté de « prédire » le côté (droit ou gauche) que le sujet va choisir pour réaliser son mouvement saccadique, en fonction des activations spécifiques obtenues en IRMf pendant cette étape. L'analyse événementielle des données en IRM fonctionnelle devrait pouvoir séparer la période de choix, de préparation et d'exécution des saccades, en visualisant les aires corticales activées spécifiquement lors de chaque étape.

10.3. ÉTUDE COMPARATIVE DE LA LOCALISATION ET DE LA FONCTION  
DES AIRES CÉRÉBRALES OCULOMOTRICES EN IRM FONCTIONNELLE  
ET EN STIMULATION ÉLECTRIQUE CÉRÉBRALE PER-OPÉRATEUR

Ce projet a pour but de comparer les résultats obtenus en IRMf pré-opérateur chez des patients présentant des lésions neurochirurgicales, avec les observations réalisées en per-opérateur lors de la stimulation électrique corticale. Cette comparaison a pour but de déterminer la correspondance entre les aires oculomotrices localisées par IRMf et les régions cérébrales provoquant des mouvements oculaires par stimulation électrique. Des mouvements oculomoteurs **ont été obtenus au bloc** opératoire par la stimulation électrique d'une région corticale située dans le champ oculomoteur frontal ; la localisation de cette région est concordante avec les données pré-opératoires obtenues en IRM fonctionnelle.

10.4. ÉTUDE PAR IRM FONCTIONNELLE DE LA RÉORGANISATION  
DES AIRES CORTICALES OCULOMOTRICES APRÈS EXÉRÈSE  
DE LÉSIONS TUMORALES ADJACENTES ET RÉCUPÉRATION DU DÉFICIT FONCTIONNEL

La survenue d'un déficit oculomoteur après une intervention neurochirurgicale à proximité des régions assurant le contrôle cortical de l'oculomotricité est mal connue. En collaboration avec l'équipe neuro-chirurgicale de la Pitié-Salpêtrière (en particulier avec le Dr H. Duffau) et l'équipe de l'unité INSERM 281 (S. Rivaud) nous nous proposons d'étudier : le type de déficit oculomoteur pouvant être observé après une telle intervention neurochirurgicale, la description de son éventuelle récupération fonctionnelle clinique, la réorganisation fonctionnelle post-opératoire des aires corticales en IRMf. Cette analyse est effectuée en comparant les patterns d'activation cérébrale pré et post-opératoire lors de la réalisation des saccades.

11. BASES NEURALES DE LA MÉMOIRE SPATIALE

S. LAMBREY, A. BERTHOZ (en coopération avec Pr BAULAC et S. DUPONT,  
Hôpital de la Salpêtrière)

Le guidage de la locomotion et la navigation exigent que le cerveau puisse réaliser une intégration multisensorielle et construire une perception cohérente des relations entre le corps et l'espace à partir des informations sensorielles données par les capteurs visuels, proprioceptifs et vestibulaires. Dans une première étude, nous avons demandé à des sujets de mémoriser puis de reproduire un trajet parcouru en réalité virtuelle. Le système de réalité virtuelle permettait de créer artificiellement un conflit sensoriel entre les informations visuelles et non-visuelles lors des rotations actives du corps entier. Lorsque les sujets arrivaient au niveau d'un virage dans le couloir virtuel, ils devaient tourner leur corps d'un angle soit supérieur à l'angle virtuel, soit inférieur, en fonction du type de conflit généré. Les résultats suggèrent que les sujets reproduisent leurs

trajets sur la base de l'un ou l'autre type des informations disponibles, en fonction du conflit généré.

Dans une seconde étude, nous avons utilisé le même dispositif expérimental et étendu les investigations à un plus large échantillon de conflits sensoriels. Le protocole était construit de manière à pouvoir analyser les comportements individuels. Les résultats permettent de distinguer trois populations de sujets. Certains sujets reproduisent leurs trajets sur la base des informations visuelles quel que soit le type de conflit. D'autres se basent toujours sur les informations non-visuelles, tandis que les sujets d'un troisième groupe sélectionnent soit les informations visuelles, soit les informations non-visuelles en fonction du type de conflit. Nous avons aussi mis au point et validé sur une dizaine de patients un protocole de navigation virtuelle destiné à l'exploration des déficits de la mémoire spatiale chez des patients épileptiques ayant subi des résections chirurgicales de l'hippocampe.

## 12. BASES NEURALES DU CHANGEMENT DE POINT DE VUE

M.-A. AMORIM, A. BERTHOZ (en coopération avec D. SCHMIDT, H. MÜLLER-GÄRTNER, B. KRAUSE, University of Dusseldorf-Julish)

Cette étude utilisera l'IRMf afin de dégager quelles sont les bases neurales de l'anticipation d'un changement de point de vue. Les sujets devront tout d'abord observer un environnement virtuel afin de mémoriser l'emplacement d'un objet cible. Après un temps fixe de présentation, le point de vue sur la scène courante sera modifié. La tâche du sujet sera d'indiquer depuis ce nouveau point d'observation si l'objet a changé de position. Selon la condition expérimentale, le futur point d'observation pourra ou non être indiqué depuis la vue initiale sur la scène, via un personnage virtuel dit « avatar ». Ainsi, il sera possible d'étudier l'effet d'un codage égo versus allocentré dans une tâche d'orientation spatiale. Cette tâche d'amorçage spatial (« spatial priming » en anglais) est nouvelle dans la littérature scientifique consacrée à l'étude des processus neurocognitifs de l'anticipation des effets visuels du changement de point de vue (Shelton et McNamara, 1997 ; Diwadkar et McNamara, 1997). Cette étude fait suite à des travaux menés au LPPA sur le rôle de l'imagerie mentale dite à la « 1<sup>re</sup> personne » versus à la « 3<sup>e</sup> personne » pendant le changement de point de vue (Amorim, Trumbore, et Chogyen, 2000).

## SÉMINAIRES

*Séminaires organisés par le laboratoire*

26 septembre : R. TAMURA, Toyama Medical and Pharmaceutical University, Japon.

*Locomotion, theta rhythm and the septo-hippocampal system.*

22 septembre : Pr A. POSTMA, Utrecht University, Pays-Bas.  
*Order and disorder in spatial memory.*

17 octobre : Pr E. BIZZI, MIT Cambridge, USA.  
*Motor learning through the combination of primitives.*

1<sup>er</sup> décembre : Dr E. MAGUIRE, Institute of Neurology, London, Grande-Bretagne.  
*The neural basis of memory and space : convergent evidence from patients and functional.*

5 décembre : Pr C. VON HOFSTEN, Department of Psychology, Uppsala, Suède.  
*The early development of eye-head coordination in infants.*

14 décembre : Pr I. EVDOKIMIDIS, Université d'Athènes, Grèce.  
*Is the distractibility factor for antisaccades a good predictor for developing psychosis ?*

27 décembre : Yoshio UCHINO, Tokyo Medical University, Japon.  
*Commissural and cross-striolar inhibition in the otolith system.*

8 janvier : Pr J.-P. LAUMOND, LAAS-CNRS, Toulouse.  
*Planification de mouvement en robotique : de la topologie à la combinatoire.*

15 janvier : Pr M. MOLINARI, Santa Lucia Institute, Rome, Italie.  
*Cerebro-cerebellar interactions in sensory processing. A key for understanding cerebellar contribution to cognition.*

13 mars : Dr Q. YANG, China Academy of Sciences, Shanghai, Chine.  
*Open-loop and closed-loop optokinetic nystagmus (OKN) in myasthenia gravis and nonmyasthenic subjects.*

13 mars : Dr L. PETIT, CNRS-CEA, GIP Cyceron, France.  
*Bases neurales de l'orientation visuo-spatiale : Attention et ocumomotricité.*

19 mars : Dr R. KRAUZLIS, Salk Institute, Californie, USA.  
*How do pursuit and saccades select the same visual target ?*

27 mars : Dr A. TZELEPI, Brain Science Institute, Riken, Japon.  
*High frequency oscillatory activity to visual pattern onset stimulation.*

21 mai : Dr T. EGGERT, Université de Munich, Allemagne.  
*Background target interaction during saccade adaptation.*

23 mai : Pr S. CORKIN, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.  
*What's new with the amnesic patient HM ?*

12 juin : Dr L. NADEL, University of Arizona, Tucson, USA.  
*The role of the Hippocampus in long-term episodic and semantic memory.*

21 juin : Pr S. MORI, National Institute for Physiological Sciences, Okazaki, Japon.  
*Acquisition of a novel capability to walk bipedally in Japanese monkeys ; Kinematics and CNS activity.*

## PUBLICATIONS

*Revue à comité de lecture*

ALBERTIN, S., MULDER, A.B., TABUCHI, E., ZUGARO, M.B., WIENER, S.I. (2000). Lesions of the medial shell of the nucleus accumbens impair rats in finding larger rewards, but spare reward-seeking behavior. *Behavioral Brain Res.* 117 : 173-183.

AMORIM, M.-A., TRUMBORE, B., CHOYEN, P.L. (2000). Cognitive repositioning inside a « desktop » VE : The constraints introduced by 1st- vs. 3rd-person imagery and mental representation richness. *Presence* : 9 (2) : 165-186.

BERTIN, R., ISRAEL, I. & LAPPE, M. (2000). Perception of two-dimensions, simulated egomotion trajectories from optic flow. *Vision Res.* 40 : 2951-2971.

BUCCI, M.-P., KAPOULA, Z., BERNOTAS, M. & ZAMFIRESCU, F. (2000). Disconjugate memory-guided saccades to disparate targets : temporal aspects. *Exp. Brain Res.* 134 : 133-138.

GALATI, G., LOBEL, E., VALLAR, G., BERTHOZ, A., PIZZAMIGLIO, L. & LE BIHAN, D. (2000). The neural basis of egocentric and allocentric coding of space in humans : a functional magnetic resonance study. *Exper. Brain Res.* 133 : 156-164.

GAYMARD, B., SIEGLER, I., RIVAUD-PECHOUX, S., ISRAEL, I., PIERROT-DESSEILLIGNY, C. & BERTHOZ, A. (2000). A common mechanism for the control of eye and head movements in humans. *Ann. Neurol.*, 47 : 819-822.

GROSBRAS, M.-H., LOBEL, E., VAN DER MOORTELE, P.F., LEBIHAN, D. & BERTHOZ, A. (2000). An anatomical landmark for the supplementary eye fields in human revealed with functional magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, 9 : 701-711.

ISU, N., GRAF, H. SATO, K. KUSHIRO, M. ZAKIR, M. IMAGAWA & Y. UCHINO (2000). Sacculo-ocular reflex connectivity in cats. *Exp. Brain Res.* 131 : 262-268.

KAPOULA, Z., BUCCI, M.-P., BERNOTAS, M. & ZAMFIRESCU, F. (2000). Motor execution is necessary to memorize disparity. *Exp. Brain Res.* 131 : 500-510.

LEPICARD, E.M., VENAULT, P., PEREZ-DIAZ, F., JOUBERT, C., BERTHOZ, A. & CHAPOUTHIER, G. (2000). Balance control and posture differences in the anxious BALB/cByJmice compared to the non anxious C57BL/Jmice. *Behav. Brain Res.* 117 : 185-195.

MCINTYRE, J., STRATTA, F., DROULEZ, J. & LACQUANITI, F. (2000). Analysis of pointing errors reveals properties of data representations and co-ordinate transformations within the central nervous system. *Neural Computation.* 12 : 2823- 2855.

MELLET, E., BRICOGNE, S., TZOURIO-MAZOYER, N., GHAEM, O., PETIT, L., ZAGO, L., ETARD, O., BERTHOZ, A., MAZOYER, B. & DENIS, M. (2000). Neural correlates of topographic mental exploration : the impact of route versus survey perspective learning. *NeuroImage.* 12 : 588- 600.

PARIS, S., BUCCI, M.P., KAPOULA, Z. (2000). Disconjugate vertical memory-guided saccades to disparate targets. *Exp. Brain Res.* 135 : 267- 274.

PETIT, J.-L. (2000). L'enracinement corporel de l'action, in « L'analyse de la singularité de l'action », J.-M. BARBIER (Éds), *Presses Universitaires de France*, Paris, 133-145.

PETIT, J.-L. (2000). Le dialogue avec les neurosciences : un regain d'actualité pour la phénoménologie, in : Jean Toussaint Desanti, Une pensée et son site. Textes réunis par G. Ravis-Giordani, *ENS Éditions*, Paris, 123-139.

SIEGLER, I. (2000). Idiosyncratic orientation strategies influence self-controlled whole-body rotations in the dark. *Cognitive Brain Res.* 9 : 205-207.

SIEGLER, I., VIAUD-DELMON, I., ISRAEL, I., & BERTHOZ, A. (2000). Self-motion perception and eye movements during a sequence of whole-body rotations about the vertical axis. *Exp. Brain Res.* 134 : 66-73.

TABUCHI, E., MULDER, A.B. & WIENER, S.I. (2000). Position and behavioral modulation of synchronization of hippocampal and accumbens neuronal discharges in freely moving rats. *Hippocampus* 10 : 717-728.

ZUGARO, M.B., TABUCHI, E., WIENER, S.I. (2000). Influence of conflicting visual, inertial and substratal cues on head direction cells activity. *Exp. Brain Res.* 133 : 198-208.

## 2001

BUCCI, M.-P., GOMES, M., PARIS, S. & KAPOULA, Z. (2001). Disconjugate oculomotor learning caused by feeble image size inequality : differences between primary and tertiary positions. *Vision Res.* 41, 625-637.

GAUNET, F., VIDAL M., KEMENY A., & BERTHOZ, A. (2001). « Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment influence on scene memory, reorientation and path memory ». *Cognitive Brain Research*, 2001, 409-420.

KREBS, M.O., GUT-FAYAND, A., AMADO, I., DABAN, C., BOURDEL, M.C., POIRIER, M.F. & BERTHOZ, A., (2001). Impairment of predictive saccades in schizophrenia. *Neuroreport.* 12 : 465-469.

LAMOURET, I., CORNILLEAU-PÉRÈS, V. & DROULEZ, I., (2001). « Lines and dots : characteristics of the motion integration process. *Vision Research.* 41 : 2207-2221.

MCINTYRE, J., ZAGO, M., BERTHOZ, A. & LACQUANITI, F. (2001). Does the brain model Newton's laws ? *Nature Neuroscience* 4 : 693- 694.

MILLERET, C. & HOUZEL, J.C. (2001). Visual interhemispheric transfer to areas 17 and 18 in cats with convergent strabismus. *Europ. J. Neurosci.* 13 : 137-152.

PETIT J.-L. (2001). De l'intentionnalité de l'acte. Chapitre 1. Perception du Monde et Perception du Langage, *J.-P. Durafour et al.* (éds). Mardaga, p. 47-78.

WEXLER, M., KLAM, F. (2001). Movement prediction and movement production. *J. Exp. Psychol. Human Perception Performance*, 27 : 48- 64.

WEXLER, M., PANERAI, F., LAMOURET, I. & DROULEZ, J. (2001). Self-motion and the perception of stationary objects. *Nature*. 409 : 85-88.

ZUGARO, M.B., BERTHOZ, A., WIENER, S.I. (2001). Background, but not foreground, spatial cues are taken as references for head direction responses by rat anterodorsal thalamus neurons. *J. Neuroscience* 21 : RC154(1-5).

#### *Diffusion Grand Public*

BERTHOZ, A. (2000). « La gravité et le système nerveux : un champ de recherche interdisciplinaire en microgravité pour le prochain siècle ». In : « Prologue pour les années 2000 », Eds. P. Vellas, F. Mayor, F. Blanchard, J. Ruffié, pp. 164-178, 2000.

#### *Chapitres d'ouvrages collectifs*

BERTHOZ, A. (2000). Le Cerveau et le Mouvement. In : Michaud, Y. *Qu'est-ce que la Vie ? Université de tous les savoirs*. (Vol. 1) Paris : O. Jacob, 450-462.

BREMMER, F., DUHAMEL, J.R., BEN HAMED, S., GRAF, W. (2000). Stages of self motion processing in primate posterior parietal cortex. In : Lappe, M. (ed) *Neuronal Processing of Optic Flow*. San Diego : *Academic Press*. 2000, 173-198.

PETIT, J.L. (2000). La critique des images mentales est-elle obsolète ? In : *Annales d'histoire et de philosophie du vivant*, vol. 3, Le Cerveau et les Images, Ph. Gallois et G. Forzy (eds), *Institut d'édition Sanofi-Synthelabo* 2000, pp. 87-101.

#### *2001*

BERTHOZ, A. & ROUSIÉ, D. (2001). Physiopathology of otolith-dependent vertigo : contribution of the cerebral cortex and consequences of cranio-facial asymmetries. Dans : Tran Ba Huy P, Toupet (Eds) : *Otolith functions and disorders*. *Adv Otorhinolaryngol*. Basel, Karger, 58 : 48-67.

KAPOULA, Z. (2001). Coordination binoculaire de la saccade : apprentissage induit par des images aniséiconiques. *Société Française d'Optique Physiologique des Sciences de la Vision*. Tome 7, n° 1, pp. 49-60.

PAILLE, D., MONOT, A., DUMONT-BÈCLE, P., KEMENY, A. (2001). « Luminance binocular disparity for 3d surface simulation », *Proceedings of SPIE. Human Vision and Electronic Imaging VI*, 22-25 Janvier 2001, San José, USA, Vol. 42999, pp. 622-633.

#### *Conférences sur invitations*

BERTHOZ, A. (2000). Neural basis of spatial memory during navigation : the concept of topokinetic memory. (Keynote Lecture) 27<sup>th</sup> Intern. Cong. of Psychology, Stockholm (Sweden), Juillet 2000.

BERTHOZ, A. : « Steering locomotion », Conférence : « Action and Visuo-Spatial Attention », Paris, 25 novembre 2000.



BERTHOZ, A. (2000). Brain mechanisms for spatial memory during navigation : the cognitive foundations of geometry. Colloque « Architectures of the mind, Architectures of the brain », Cité du Vatican-Rome, septembre 2000.

BERTHOZ, A. (2000). « Le cerveau, le mouvement et la gravité ». Conférence : Sciences et Société — Les rencontres 2000, Italie, Université de Tor Vergata — Villa Mondragone), le 23 octobre 2000.

BERTHOZ, A. (2000). Cortical mechanisms underlying the control of saccadic eye movements : PET and fMRI studies. Symp. « Eye Movements and Vision in the Natural World », Rotterdam, septembre 2000.

BERTHOZ, A. (2000). Neural basis of spatial memory during navigation. Symp. « New Horizons in Neuroscience — Brain in Health and Disease », Dublin, septembre 2000.

BERTHOZ, A. (2000). Biologie et Mathématiques. Colloque « Mathématiques et autres champs du savoir », ENS, mai 2000, Paris.

BERTHOZ, A. & CLEMENT, G. (2000). Neurosciences : troubles de l'équilibre statique et dynamique de la coordination. Journée « L'espace au service de la médecine », organisé par le CNES, l'Association aéronautique et Astronomique de France et l'Institut de Médecine et Physiologie spatiale, MEDES, Mars, Paris.

ISRAËL I. (2000). Linear path integration : integration or interpretation ? Séminaire invité au man Vehicle Laboratory, MIT, Cambridge (Prof. C. OMAN), 6 décembre 2000.

MILLERET, C. (2000). Intégration interhémisphérique visuelle et plasticité chez le mammifère supérieur. Club des Neurosciences Cognitives du Développement, Paris, février 2000.

MILLERET, C. (2000). Développement et plasticité de la carte corticale du champ visuel calleux primaire chez le mammifère supérieur. Lab. De Pharmacologie, Collège de France, Paris, octobre 2000.

PETIT, J.-L. (2000). Phénoménologie de l'orientation. Au colloque « Espace du geste et de la posture ». Centre de recherche en activités physiques et sportives, Université de Caen, 10-11 avril 2000.

PETIT, J.-L. (2000). Théorie de l'esprit et phénoménologie naturalisée. Journée scientifique du CREA, 15 juin 2000.

PETIT, J.-L. (2000). La spatialité originaire du corps propre. Conférence au séminaire « géométrie et cognition » (DMI, CNRS, ENS), 13 décembre 2000.

PETIT, J.-L. (2000). L'enracinement corporel de l'action. in : « L'analyse de la singularité de l'action », J.-M. BARBIER (éd.), *Presses Universitaires de France*, Paris, 133-145.

PETIT, J.-L., (2000). Le dialogue avec les neurosciences : un regain d'actualité pour la phénoménologie, in : Jean Toussaint Desanti, Une pensée et son site. Textes réunis par G. Ravis-Giordani, *ENS Éditions*, Paris, 123-139.

WIENER S.I. (2000). Recordings of hippocampal neurons in behaving rats show little evidence for task-specific activity changes during learning and memory or spatial problem solving. Pages 45-49, dans : Journées Internationales d'Orsay sur les Sciences Cognitives JIOSC 2000 — L'apprentissage, une approche transdisciplinaire.

WIENER, S.I. (5 octobre 2000). « Influences multisensorielles et motrices sur les représentations neuronales de l'espace », CNRS EP 1848 Laboratoire de Neurophysique et Physiologie du système moteur, Paris.

WIENER, S.I. (2000). « Reading and communication the hippocampal code — Brighton, UK, 27 juin 2000.

WIENER, S.I. (16 octobre 2000). « Bases neuronales de la cognition spatiale ». Réseau des Sciences Cognitives de l'Ile-de-France, atelier », La représentation de l'espace, Paris.

### 2001

BERTHOZ, A. (2001). « Exemples d'apport réciproque des STIC et des Neurosciences Cognitives : robotique de navigation et mémoire spatiale, robotique de manipulation et capture d'une balle ». Journée ASTI, 25 avril 2001.

BERTHOZ (2001). « The Role of Vestibular System in Spatial Memory and Navigation ». « The vestibular and oculomotor system basic mechanisms and clinical applications ». Paris, 5 mars 2001.

DROULEZ, J. (2001). Interactions visio-vestibulaires dans la perception du mouvement propre et des distances. Colloque INRETS, janvier 2001.

DROULEZ, J. (2001). Contraintes et modèles internes comme reflets des régularités du monde. Atelier Philosophie de l'Action et Neurosciences, juin 2001.

GRAF, W. (2001). « Fusion multisensorielle dans l'aire intrapariétale ventrale (VIP) : Signaux impliqués et relations entrées-sorties ». Séminaire invité, Université de Bordeaux II, 21 février 2001.

GRAF, W. (2001). Colloque : « Neural Control of Movement ». Séville, 25-31 mars 2001.

GRAF, W. (2001). « The multifunctional role of the vestibular system : from the brain stem to the cortex, and back ». Colloque en Neuroinformatique, séminaire invité, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), 18 mai 2001.

GRAF, W. (2001). The vestibular and oculomotor system : basic mechanisms and clinical implications. International Symposium. Seeon (Munich), 4-6 mars 2001.

GRANTYN, A., MOSCHOVAKIS, A.K. & KITAMA, T. (2001). Control of orienting movements : Role of multiple tectal projections to the lower brain stem. « Higher Nervous Control of Posture and Locomotion : Parallel and Centralized Control Mechanisms », International Symposium at the National Institute of Physiological Sciences, Okazaki, Japan, mars 2001.

MCINTYRE, J. (2001). ESA topical team meeting : « Effects of gravity on haptic perception : experiments aboard the MIR space station », Birmingham, UK, 30 juin 2001.

MCINTYRE, J. (2001). Atelier Philosophie de l'Action & Neurosciences : « Modèle interne : du bon usage d'un concept flou en neurosciences », Collège de France, Paris, 15 juin 2001.

MCINTYRE, J. (2001). 5<sup>e</sup> Colloque de la Société des Neurosciences françaises : « Modèles internes de l'influence de la gravité pour l'anticipation dans la capture d'objets en mouvements ». Toulouse, 30 mai 2001.

MILLERET, C. (2001). « Développement et plasticité de la carte corticale du champ visual calleux primaire chez le mammifère supérieur », Laboratoire de Psychobiologie du développement, EPHE, Paris.

MILLERET, C. (2001). « Les cellules gliales sont-elles susceptibles de participer à l'élaboration et la restructuration des cartes corticales sensorielles chez les mammifères ? », Journée Inaugurale de l'Institut de Biologie du Collège de France, Paris.

PETIT, J.-L. (2001). De l'intentionnalité de l'Acte. Chapitre 1. Perception du Monde et Perception du Langage, J.-P. Durafour *et al.* (eds). Mardaga, 47-78.

SIEGLER, I. « Proprioceptive self-motion perception and contribution of kinaesthetic cues to driving in a dynamic simulator ». Biological Cybernetic Seminars, Max Planck Institute, Tübingen, 15 juin 2001.

WIENER, S.I. (2001). « Comparisons of hippocampal and accumbens responses in simultaneous recordings of freely moving animals » au laboratoire du Pr. J. O'KEEFE, University College London, 30 mars 2001.

WIENER, S.I. (2001). « Influences multisensorielles et motrices sur les représentations neuronales de l'espace ». CNRS LNC, Marseille, 5 janvier 2001.

WIENER, S.I. (2001). « Influences multisensorielles et motrices sur les représentations neuronales de l'espace ». CNRS UMR 5106, Université de Bordeaux I, 5 janvier 2001.

WIENER, S.I. (2001). « Influence of gravito-inertial signals on the ontogenesis of internal representation of position and head direction. International Conference on Gravity Development and Adaptation in Animal Models, 2 mars 2001, Marseille.

#### *Communication avec actes*

2000

BUCCI, M.P., KAPOULA, Z. & ROUSSAT, B. (2000). Binocular coordination of horizontal saccades in strabismic children before and after surgery. *Eye movements and vision in the natural world*, Amsterdam, 27-29 September 2000.

COUBARD, O. & KAPOULA, Z. (2000). « Initiation of anticipatory saccade-vergence combined movements under predictable conditions ». Symposium « Eye

movements and vision in the natural world » — Amsterdam, Rotterdam, 27-29 September 2000.

DUBROVIN A., LELEVÉ J., PREVOST A., CANRY M., CHERFAN S., LECOCQ P., KELADA J.M., KEMENY A. (2000). « Application of real-time lighting simulation for intelligent front-lighting studies ». Proceedings of the driving simulation conference, Paris, Collège de France, 333-346.

GAUNET, F., VIDAL, M. & BERTHOZ, A. (2000). Scenes recognition and path integration in a virtual world. XXVIIth Intern. Cong. of Psychology, Stockholm, juillet 2000.

GRAF, W. (2000). « J.B. Johnston Club » (*Brain Behav. Evol*), New Orleans, USA, 3-4 Novembre 2000.

GRAF, W., DUBAYLE, D., KLAM, F., BIARNAIS, T., BÜTTNER-ENNEVER, J. & UGOLINI, G. (2000). Horizontal eye movement network in primates. I. Monosynaptic input, *Soc. Neurosci. Abst.* 26 : 365.5, 2000.

GRAF, W., UGOLINI, G., DUBAYLE, D., GRANTYN, A., BRANDI, A., BERTHOZ, A., BÜTTNER-ENNEVER, J., MOSCHOVAKIS, A. (2000). Horizontal eye movement network in primates. II. Polysynaptic input. *Soc. Neurosci. Abst.* 26 : 363.6, 2000.

GRAF, W., GULDIN, W., DAHRMANN, G., DOLDAN, M., BÄURLE, J., MOSCHOVAKIS, A. & UGOLINI, G. (2000). Horizontal eye movement network in primates. III. Cortical relays. *Soc. Neurosci. Abst.* 26 : 363.7, 2000.

ISRAEL, I. (2000). Can the distance of linear transport in darkness be computed? Fourth International Conference on Cognitive and Neural Systems, May 24-27, Boston (USA).

ISRAEL I., NICO D., VENDÔME J., BERTHOZ A. (2000). Can the brain compute distance of linear transport? *Soc. Neuroscience*, New Orleans, USA.

ISRAEL, I. (2000). Linear self-motion perception : do the otoliths actually play a role? FENS, Brighton, June 24-28, UK.

KAPOULA Z., EVDOKIMIDIS I., SMYRNI N., & CONSTANTINIDIS T. (2000). EEG cortical potentials preceding vergence and combined saccade-vergence eye movements. *Soc. Neuroscience Abst.* 744.6.

KEMENY A. (2000). « Simulation and perception of movement ». Proceedings of the driving simulation conference, Paris, Collège de France.

MARTIN P.D., BERTHOZ A. (2000). Spatial firing of hippocampal CA1 complex spike cells is less specific in young rats. *Soc. Neurosci. Abst.* 26, 983.

LAMBREY, J.L., VIAUD-DELMON, I. & BERTHOZ, A. (2000). Influence of a sensory conflict upon spatial memory of displacements. Action and Visuo-spatial Attention : Königswinter, Allemagne, novembre 2000.

LAPPE, M., GRIGO, A., BREMMER, F., FRENZ, H., BERTIN, R.J.V. & ISRAEL, I. (2000). Driving Simulation Conférence : « Études perceptionnelles et ergonomiques », 6 septembre 2000, Collège de France.

PARIS, S., KAPOULA, Z., BUCCI, M.-P., & DAUNYS, G. (2000). Memory-based disconjugate learning for downward saccades : a subject-dependant phenomenon. Eye movements and vision in the natural world (EMCO), 27-29 septembre, Amsterdam.

PUECH, H., KAPOULA, Z. & PARIS, S. (2000). Quality of binocular motor coordination in subjects with vertical phoria. Eye movements and vision in the natural world (EMCO), 27-29 septembre, Amsterdam.

REYMOND G., KEMENY A., HEIDET A., & CANRY, M. (2000). « Validation of Renault's dynamic simulator for adaptive cruise control experiments ». Proceeding of the driving simulation conference, Paris, Collège de France, 181-191, septembre 2000.

RIVAUD-PÉCHOUX, S., ISRAËL, I., LÉBOUCHER, P., GAYMARD, B., BERTHOZ, A., PIERROT-DESSEILLIGNY, C. (2000). Thalamus (VIM) stimulation impairs vestibular function after rotation in humans. *Soc. Neuroscience*, New Orleans (USA).

VITTE E, ISRAËL I, RIVAUD-PÉCHOUX S., LÉBOUCHER P., GAYMARD B., BERTHOZ A., PIERROT-DESSEILLIGNY C. (2000). Low frequency stimulation of the thalamus (VIM) induces impairment of vestibular function in humans (case report). Barany Society Meeting, Uppsala, June 2000.

WATROBA, L., MILLERET, C. & BUSER, P. (2000). L'altération unilatérale de la vision chez le chat adulte modifie les propriétés fonctionnelles de la carte corticale du champ visuel calceux à la bordure 17/18. Journée du Réseau Sciences Cognitives, Paris, octobre 2000.

WIENER, S.I., BERTHOZ, A. & ZUGARO, M.B. (2000). Preferred directions of thalamic head direction cells are controlled by 3D objects only when they are the most distant visual cues in the periphery. *Soc. Neurosci. Abstr.* 26, 983.

WIENER, S.I., TABUCHI, E., MULDER, A.B. (2000). Reward site related activity and reward value invariance in hippocampal neurons of behaving rats. *Eur. J. Neurosci* 12 (Suppl. 11), 160.

ZUGARO, M.B., TABUCHI, E., FOUQUIER, C., BERTHOZ, A., WIENER, S.I. (2000). Peak firing rates of anterodorsal thalamic head direction cells decrease during passive rotations in rats trained to remain immobile while unrestrained. *Soc. Neurosci. Abst.* 26, 984.

## 2001

BERTHOZ, A. (2001). The Role of Vestibular System in Spatial Memory and Navigation. The vestibular and oculomotor system basic mechanisms and clinical applications, 5 mars, Paris.

BERTHOZ, A., RESCHKE, M.F. (2001). Behavioral evidence that neural strategies evolve during space flight for the maintenance of gaze stability and ocular-motor performance. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

BERTHOZ, A., PATRON, J., POZZO, T., STAPLEY, P., GRISHIN, A. (2001). Coordination between posture and movement in microgravity. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

BERTHOZ, A., POZZO, T., PATRON, J., KAPRINSKI, R. (2001). Long duration space flight effects on head stability during locomotion. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

BERTHOZ, A., PAPAXANTHIS, C., POZZO, T. (2001). Weightlessness modifies mentally simulated motor action. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

ISRAËL, I., CROCKETT, M., ZUPAN, L., MERFELD, D. (2001). Le temps influence-t-il les signaux des otolithes ? 5<sup>e</sup> Colloque de la Société des Neurosciences, Toulouse, 28-31 mai 2001.

KAPOULA, Z., BUCCI, M.P., YANG, Q., BRÉMOND-GIGNAC, D., YANG, Q., & WINER-VACHER, S. (2001). Latency-accuracy characteristics of eye movements in 3D space in children. 8th Child Vision Research Meeting (CVRS), 14-16 juin, Paris.

KAPOULA, Z., BUCCI, M.P., YANG, Q., BRÉMOND-GIGNAC, D., YANG, Q., & ROUSSAT, B. (2001). Binocular coordination of saccades in strabismic children before and after surgery. 8th Child Vision Research Meeting (CVRS), 14-16 juin, Paris.

MAES, J.-M., ROUSIE, D., BERTHOZ, A., FERRI, J. (2001). Implications des asymétries craniofaciales dans les douleurs orofaciales. Algies faciales, Colloque du 19 mai, Hôpital Salpêtrière, Paris.

MCINTYRE, J., LIPSHITS, M.I., LEONE, G., BERTHOZ, A., DESHONEN, S. (2001). Gravity and brain hemispheric specialisation in a bilateral symmetry detection task. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

MCINTYRE, J., LIPSHITS, M.I., ZILLI, J., BERTHOZ, A. (2001). Haptic perception of force and form and the control of force and movement with and without gravity. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

MCINTYRE, J., LIPSHITS, M.I., ZAOU, M., GURFINKEL, V., BERTHOZ, A. (2001). Multi-modal reference frames for visual-haptic coordination. Congrès sur les résultats de la station MIR, Lyon.

MILLERET, C. (2001). « Les cellules gliales sont-elles susceptibles de participer à l'élaboration et la restructuration des cartes corticales sensorielles chez les mammifères ? », Journée Inaugurale de l'Institut de Biologie du Collège de France, Paris.

MILLERET, C. (2001). « Shifting of the primary callosal visual field in adult mammal with early unilateral convergent strabismus », 8th Biennial Meeting « Child Vision Research Society », Paris, juin 2001.

ROCHFORT, N., QUENECH'DU, N., WATROBA, L., MALLAT, M., GIAUME, C. & MILLERET, C. (2001). Étude du développement de la distribution des cellules

gliales (microglie et astrocytes) dans et sous les aires visuelles corticales primaires 17 et 18 du chaton. Journée Inaugurale de l'Institut de Biologie, Collège de France, Paris, mai 2001.

WATROBA, L., BUSER P. & MILLERET, C. (2001). Une altération de la vision binoculaire chez le mammifère adulte induit des changements fonctionnels au sein de la carte corticale calleuse Journée Inaugurale de l'Institut de Biologie, Collège de France, Paris, mai 2001.

WEXLER, M., PANERAI, F., LAMOURET, I & DROULEZ, J. (2001). Self-motion and allocentric criteria in spatial vision. Vision Sciences Society, Florida, USA.

ZUGARO, M.B., TABUCHI, E., BERTHOZ, A., WIENER, S.I. (2000). Interplay of externally and internally generated self-movement signals in updating neurons sensitive to heading direction in behaving rats. Pages 121-128 dans : Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to animats (SAB 2000), Supplement. Eds. : J.-A. MEYER, A. BERTHOZ, D. FLOREANO, H.L. ROITBLAT, S.W. WILSON.

#### *Organisations de Réunions*

BERTHOZ, A. (2000) :

— Conférence « Driving Simulation conference » (INRETS, Renault, LPPA), septembre 2000.

— Co-organisation de la VI<sup>e</sup> conférence. Internationale : On the simulation of adaptive behaviour « From animals to animals ». Collège de France, sept. 2000.

ISRAËL, I., MERGNER, T. (2000). Human self-motion perception. FENS 2000, Brighton, UK, 24-28 June 2000, Symposium n° 9.

KEMENY, A. :

— DSC 2000 « Driving Simulation Conference ». Conférence internationale sur la simulation de conduite, Collège de France, Paris, septembre 2000.

— Séminaire « Images Virtuelles ». Technocentre Renault, Guyancourt, janvier 2001.

— Séminaire « Images Virtuelles ». Collège de France, Paris, juin 2001.

PETIT, J.-L. (2000). Atelier de Neurosciences et Philosophie de l'Action : « Schéma corporel », 20 décembre 2000.

WIENER, S. (2000). Coordination d'une conférence internationale : « Reading and communicating the hippocampal code », FENS, Brighton, Royaume Uni, 27 juin 2000.

BERTHOZ, A., JOUVENT R. (2001). « Anxiété et Cognition Spatiale », Colloque, Paris, 19 janvier 2001.

BERTHOZ, A. (2001). « Rôle de la gravité dans le développement et le fonctionnement des systèmes sensori-moteurs et de la perception. Symposium Neurosciences, 28 au 31 mai, Toulouse.

GRAF, W. (2001). « Cerebellar and cortical control of eye movement » European Research Conference, 31 mars/5 avril 2001, Granada (Espagne) (co-organisateur).

GRAF, W. (2001). « Is there still need for comparative Neuroscience ? International symposium. 28. Göttinger neurobilogentragung 4/ Tagung der neurowissenschaftlichen Gesellschaft. Göttingen, 6-7 juin 2001 (organisateur et coprésident).

MCINTYRE, J. Co-responsable de l'organisation du « Club du Mouvement » d'Ile-de-France.

PETIT, J.-L., BERTHOZ A. (2001) :

— Atelier de Neurosciences et Philosophie de l'Action : « L'autonomie de l'agent humain », 27 mars 2001.

— Atelier de Neurosciences et Philosophie de l'Action : « Le modèle interne », 15 juin 2001.

### *Enseignement*

BERTHOZ, A. :

— Cours aux DEA de biomécanique et physiologie du mouvement (4 heures), Paris VI.

— Cours aux DEA des Sciences cognitives et de Neurosciences (6 heures), Paris VI.

— Cours au séminaire des Sciences cognitives de l'école polytechnique (1 heure).

BUCCI, M.-P. :

— Enseignement au Certificat de Qualification Professionnel (formation post-BTS Opticien-Lunetier), Institut et Centre d'Optométrie, Bures-sur-Yvette (8 heures), cours magistraux sur le thème « Le développement oculomoteur chez l'enfant ».

— Responsable de stage pratique aux élèves d'orthoptie (mars-avril 2001, 16 heures).

COUBARD, O. Monitorat en psychologie expérimentale (méthode expérimentale ; perception ; mémoire), Université Paris 5.

DROULEZ, J. :

— DEA Sciences cognitives « perception et Action », EHESS, Paris VI, École Polytechnique.

— Maîtrise d'Optique Physiologique, « Génération & Perception du mouvement ».

— DU d'Optique Physiologique, Université Paris-Sud.



KAPOULA, Z. :

— Enseignement Orthoptie (9 heures), cours magistraux.

— Enseignement au Diplôme Universitaire Science de la Vision, Orsay, Paris XI (13 heures), cours magistraux.

KEMENY, A. Module Perception et Simulation, DEA informatique fondamentale et applications. Université de Marne-la-Vallée.

MCINTYRE, J. DEA de Physiologie et Biomécanique de la Performance Motrice, Université Paris-Sud, Option « Biomécanique et Physiologie du Mouvement », Module « Bases neurales du mouvement ».

MILLERET, C. :

— Hôpital Necker-Enfants Malades : Cours de 2<sup>e</sup> année d'Orthoptie portant sur « Les fondements anatomo-fonctionnels de l'amblyopie strabique » (2 heures).

— Université Paris VI : Cours magistraux de Maîtrise. Module de Neurosciences des Systèmes Intégrés « Mécanismes neurobiologiques de la perception visuelle » (12 heures).

— Université René Descartes : Centre Universitaire de formation continue des Saints Pères : Cours magistral dans le cadre du Diplôme d'Université « Techniques de compensation du handicap visuel » — Compensations multi-sensorielles lors des handicaps visuels (3 heures).

— Formation en Optométrie : Cours magistral portant sur « Les substitutions sensorielles et reconstruction de l'espace chez les aveugles et les malvoyants profonds » (6 heures).

— Centre hospitalier régional et universitaire de Nantes : Cours magistraux dans le cadre du DU de Strabologie « Le système visuel des Primates » et « Le développement du système visuel » (4 heures).

— Hôpital des Quinze-Vingts : Cours magistral dans le cadre du diplôme Interuniversitaire de Psturologie Clinique « Troubles oculomoteurs, corps calleux et posture » (2 heures).

SIEGLER, I. Module statistique et applications informatiques, DEUG 2, UFR STAPS, Paris V.

PUECH, H. :

— Responsable du Diplôme d'Université d'Optométrie de Lyon (1999-2000).

— Enseignement d'Optométrie au Certificat de Qualification Professionnelle destiné aux opticiens DE (2000-01).

— Enseignement d'Optométrie à la formation continue des opticiens de l'enseigne Visual (2000-01).

— Enseignement d'Optométrie à la formation initiale des MST — Paris Sud.

*Participation à l'organisation de la recherche*

BERTHOZ, A. :

— Président de l'Institut de Biologie du Collège de France jusqu'en janvier 2001.

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

— Directeur de l'ACI « Neurosciences intégratives et computationnelles » — Ministère de la Recherche.

MILLERET, C. Membre nommée puis élue du Comité National des Universités (Section 69) — 1998/2003.

WIENER, S.I. :

— Membre de la Commission d'évaluation des candidats pour les postes d'ATER, Collège de France.

*Valorisation et collaboration avec l'Industrie*

BERTHOZ, A. Participation aux programmes « Europe EUREKA », « CARDS » et « ULTIMATE » (simulation automobile).

DROULEZ, J. & PANERAI, F. Programme VALSID/PREDIT. Validation perceptive de simulateur de conduite pour poids-lourds, en collaboration avec Renault VI et l'INRETS.

DROULEZ, J. & HASSOUMI, N. Programme d'études de la segmentation de nuages de points 3D en collaboration avec EDF.

KAPOULA, Z. Aspects temporels du contrôle des mouvements des yeux dans l'espace 3D. Séminaire Renault : Images Virtuelles, janvier 2001, 40-49.

KEMENY, A. :

— Projet EUREKA CARDS (Régie Nationale des Usines Renault). Étude d'un simulateur de conduite virtuelle.

— Projet VALSID/PREDIT (Renault, Renault VI, INRETS). Étude d'un simulateur dynamique Poids Lourds.

— Projet EUREKA ULTIMATE (Renault). Étude d'un simulateur de recherche grand mouvement à système visuel embarqué (casque ou écran).

MCINTYRE, J. :

— Essais de pilotage et coordination visuo-haptique, EADS/Médès, Toulouse.

— Développement d'un système de mesure de mouvement opto-inertiel avec InterSense (Boston, USA), Charwood Dynamics (Leicester, UK) et le CNES (Toulouse).

*Contrats de recherche et coopérations internationales*

GRAF, W. Contrat CEE — Biotechnology.

ISRAËL, I. Rotation : Expression chorégraphique. Programme Cognitique « Art et Cognition » (2000-2002).

JOUEN, F., VITAL-DURANT, F. & MILLERET, C. *Contrat Cognitique Action : Développement et Plasticité des couplages visuo-posturo (L'approche comparative chez l'homme et chez l'animal) (2001-2003).*

ZOI KAPOULA :

— Contrat de Recherche : Exploration oculomotrice pendant la conduite automobile. PSA PEUGEOT du 6/12/1999 au 6/12/2002.

— Réseau de recherche sur « La Perception de l'espace 3D : art, philosophie et sciences de la vision », avec Y. Trotter (UMR 5549, coordinateur). Coopération financée par programme Cognitique, appel d'offres « Cognition Spatiale ».

— Contrat de recherche « Navigating in the cognitive space of words : orientation mechanisms and representations », coordonné par F. Vitu (LPE CNRS UMR 8581), dans le cadre d'action MRT Cognitique « Dysfonctionnement cognitif ».

— INSERM — Déficiences visuelles aux âges extrêmes (01/1999 au 31/12/2001).

#### *DEA*

CHARRON, C. « Réponses aux stimulations sensorielles des neurones sensibles à la direction de la tête : électrophysiologie et simulation avec des réseaux de neurones ». DEA Sciences cognitives, Université Paris VI.

TUSCHER, A. « Le regard de l'architecte » : Essai psychophysique et philosophique sur la perception des distances. DEA de Sciences Cognitives, 2000.

VENDOME, J. DEA de biomécanique, 2000.

PUECH, H. « Déficiences du contrôle binoculaire oculomoteur chez les sujets hyperphoriques ». DEA Neurosciences, Université Paris VI, septembre 2001.

ROCHEFORT, N. « Rôle potentiel des cellules gliales (microglie et astrocytes) dans le développement et la plasticité des connexions calleuses visuelles chez le chat ». DEA de Neurosciences (PVI), 2001.

#### *Thèse*

SIEGLER, I. « Contribution à l'étude de la perception vestibulaire du mouvement propre et de ses relations avec la stabilisation du regard et l'orientation spatiale ». Thèse de doctorat, Université Paris-Sud (3 juillet 2000). Félicitations du jury

PARADIS, A.L. Exploration par IRM fonctionnelle de la perception visuelle des formes tri-dimensionnelles : dessin de paradigmes d'acquisition et outils d'analyse appliqués au domaine de la vision. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6 en Sciences Cognitives (mars 2001). Félicitations du jury

REYMOND, G. Thèse de doctorat « Contribution respective des stimuli visuels, vestibulaires et proprioceptifs dans la perception du mouvement du conducteur », Université Paris VI (décembre 2000). Félicitations du jury.

*Distinctions*

BERTHOZ, A. (2000). Élu membre correspondant étranger de l'Académie Royale de Médecine de Belgique.