

## **REACTIF ET PREDICTIF : DEUX MODES DE GESTION DE LA MOTRICITE**

**JACQUES PAILLARD**

### **RESUME**

*Les récents développements des approches neuroanatomiques, neuropathologiques et neurophysiologiques de l'organisation des contrôles moteurs suggèrent une ségrégation fonctionnelle des aires prémotrices corticales en deux grands secteurs dorsomédians et ventrolatéraux. Ces deux secteurs aux origines phylogénétiques différentes se différencient par la nature des connexions qui les relient aux secteurs sous-corticaux et aux grandes aires associatives. Le premier est essentiellement afférenté par les informations d'origine interne et s'articule sur les boucles de régulation des ganglions de la base ; sur le second convergent des informations polysensorielles d'origine extéroceptive et se ferment les boucles de régulation néocérébelleuse. A ces deux ensembles fonctionnels correspondent deux modes de gestion de la motricité : prédictif et réactif. Le premier implique la dynamique d'un opérateur cognitif d'inférence alimenté par les mémoires représentationnelles du système et la mise en oeuvre de processus d'anticipation, le second repose sur la disponibilité d'un répertoire de montages moteurs tout prêt à fonctionner résultant de la stabilisation dans les mémoires dispositionnelles du système de prédispositions génétiquement déterminées ou secondairement acquises par apprentissage.*

*L'interaction des dispositifs réactionnels sensorimoteurs et des processus cognitifs anticipateurs est envisagée comme objectif expérimental et dans la perspective d'une application au champ des activités physiques et sportives.*

## **ABSTRACT**

*Recent advances in neuroanatomy, neurophysiology and neuropathology suggest a functional dissociation within the premotor cortical areas between two major sectors : dorsomedian and ventrolateral. These two sectors have different phylogenetic origins and are distinguished by the nature of the connections which link them with the principal cortical association areas and with subcortical structures. The dorsomedian sector receives input of essentially internal origin and is connected to the regulatory loops of the basal ganglia. The ventrolateral sector receives polysensory input of exteroceptive origin and is mainly connected to the neocerebellar control loops.*

*These two functional systems are associated with two operational modes for generating motor acts : predictive and reactive. The predictive mode involves a cognitive operator based on inference ; it is fed by the data-base of "representational" memory and brings into play processes of anticipation. The reactive mode relies on the availability of a repertoire of functional motor habits that are stabilized in "dispositional" memory and derived from either genetically prewired circuits or learned predispositions.*

*The interaction of reactive sensorimotor processes and anticipatory cognitive processes has to be studied in the light of its relevance to our understanding of motor skills in the domain of sport.*

*MOTS-CLES : anticipation, contrôle moteur, neurosciences, sport.*

*KEY-WORDS : anticipation, motor control, neurosciences, sport.*

L'étonnante capacité des organisations vivantes à résister aux agressions multiples de leur environnement et à perdurer le temps d'un cycle vital, tout en assurant leur reproduction, repose fondamentalement sur l'existence d'une variété d'appareils fonctionnels préadaptés. Sélectionnés au cours de l'histoire évolutive de l'espèce, ces préadaptations s'inscrivent dans la mémoire génétique comme des prédispositions qui anticipent les conditions de vie les plus probables auxquelles l'organisme de cette espèce sera confronté à sa naissance. Ils lui permettent de réagir d'emblée et efficacement aux sollicitations du milieu dans un sens favorable à sa survie.

La mémoire individuelle prend ensuite le relais de la mémoire génétique. Son développement traduit le perfectionnement, à l'échelle de l'individu, d'une capacité de contrôle de ses activités présentes qui tient compte de l'expérience qu'il a tirée de ses actions antérieures. Grâce à cette expérience, l'organisme enrichit le répertoire de ses prédispositions génétiques de prédispositions acquises, immédiatement disponibles et mobilisables en présence d'une situation prévisible ou d'une situation reconnue comme familière. Il y gagne alors en rapidité d'intervention, en efficacité de réponse et en économie de moyens. L'accroissement de telles capacités est corrélatif du développement de son système nerveux.

L'étude du système nerveux a longtemps été dominée par une conception de son fonctionnement qui l'identifiait à une machine à réagir, capable de répondre automatiquement aux sollicitations de son environnement par la mobilisation coordonnée d'instruments moteurs préadaptés (cf. le modèle réflexologique classique de la Physiologie Sherringtonienne et le schéma S-R de la Psychologie behaviouriste). La progression des Neurosciences contemporaines incite à mettre aujourd'hui l'accent sur la capacité du système nerveux à extraire les invariances et les régularités dans le chaos d'informations que collectent les organes des sens. Elle invite, par suite, à prendre en considération à côté des capacités de la "machine réactive" ses propriétés de "machine prédictive". D'où un intérêt nouveau, au moins de la part des neurobiologistes, pour la conception de l'existence, dans les mémoires du système, d'une représentation interne d'un modèle d'environnement prévisible (Craik, 1943). C'est sur la base d'une telle représentation que le système acquiert le pouvoir de gérer ses instruments moteurs de manière prédictive. Grâce à ses possibilités d'anticipation ou d'extrapolation à plus ou moins court terme, il devient capable d'élaborer des projets d'action et de planifier leur exécution en fonction des conséquences prévisibles de leur réalisation effective en actes. Par là même l'organisme

échappe aux impératifs d'une réactivité directe aux sollicitations de l'environnement, il se libère de la tyrannie du stimulus et, profitant du silence comportemental qui en résulte, se trouve, dès lors, à même de développer les dialogues internes propres à ses activités mentales (Oakley, 1985). On s'accorde aujourd'hui à penser que c'est l'expansion d'une telle capacité qui confère au cerveau de l'Homme son privilège le plus fondamental (Paillard, 1987a).

Cette évolution récente des Neurosciences marque une étape dont l'importance doit être soulignée dans ses conséquences théoriques et pratiques. Elle autorise, en effet, l'espoir d'une convergence prochaine des approches traditionnelles de la Psychologie cognitive avec celles de la Neurophysiologie classique et, par suite, celui d'une fertilisation réciproque de ces deux champs de connaissances jusqu'ici séparés.

## **1. ANTICIPATION ET RÉACTION : LA RESURGENCE D'UN VIEUX PROBLÈME**

Dans cette perspective l'intérêt d'une étude de la problématique du "réactif et du "prédictif" réside certainement moins dans la nouveauté d'une telle distinction déjà souvent invoquée dans le passé que dans l'originalité des nouveaux objectifs expérimentaux que suggèrent certaines données, neuroanatomiques et fonctionnelles, récentes sur la dualité des contrôles moteurs d'origine corticale.

Notons aussi que cette dissociation entre modalités réactive et prédictive de gestion des instruments sensori-moteurs était déjà implicitement présente dans le schéma que nous avons proposé voici quelques années (Paillard, 1985, 1987a) pour distinguer les niveaux sensori-moteur et cognitif du contrôle de l'action.

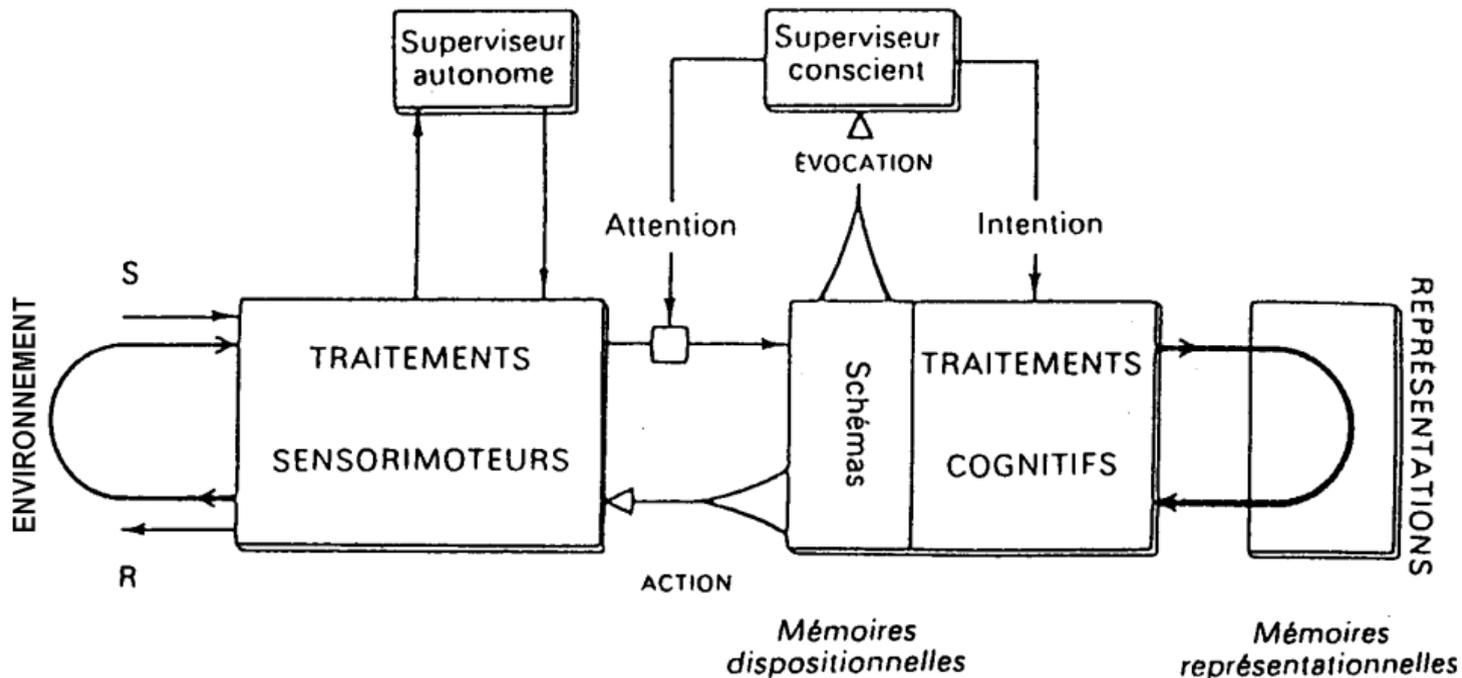
Ce schéma (voir figure 1) envisageait, en effet, l'interaction entre deux compartiments de l'organisation des architectures nerveuses :

- 1) un compartiment "sensori-moteur" où le jeu des circuits génétiquement précâblés assure le dialogue direct entre l'organisme et son environnement à la fois sur un mode "réactif" de mobilisation directe des montages moteurs de ce niveau par les stimulations de l'environnement mais aussi sur un mode interrogatif où c'est l'activité motrice elle-même qui est génératrice d'une modification du champ des afférences recueillies par les organes sensoriels, modification qui, en retour, vient influencer le

déroulement de l'action (on retrouve là la distinction classique de Von Holst entre exafférences et réafférences).

- 2) un compartiment "cognitif", alimenté par les informations collectées et prétraitées par les instruments sensori-moteurs. Ce compartiment assure par le jeu des contrôles attentionnel et intentionnel une gestion indirecte des instruments sensori-moteurs sur un mode principalement "prédictif". Il contribue aussi par le jeu des apprentissages associatifs à enrichir le répertoire des activités motrices automatiquement mobilisables par les sollicitations directes du monde extérieur.

Comme tout schéma simplificateur celui-ci a l'inconvénient de masquer certaines nuances importantes qu'il importe préalablement de préciser pour la clarté de l'argumentation qui va suivre, s'agissant notamment de l'usage des concepts d'anticipation et de prévision. Dans l'important travail que Jean-Francois Chatillon a consacré à l'analyse des conduites sensori-motrices complexes (voir en particulier Chatillon 1985), cet auteur soulève en particulier le problème de l'usage ambigu de la notion d'anticipation. La Psychologie cognitive, nous rappelle-t-il, parle d'anticipation de l'action "lorsque l'analyse de la conduite montre que l'individu en prépare mentalement l'exécution". Et il s'inquiète, de ce fait, de me voir dans mes écrits antérieurs (il se réfère notamment à Paillard, 1976b) utiliser le même terme d'anticipation pour désigner les prédispositions fonctionnelles inscrites dans les compétences initiales d'un organisme aussi bien que celles qui résultent d'un enrichissement du répertoire par les processus d'apprentissage et d'automatisation. En dépit de l'imprécision sémantique qui peut en résulter, je ne pense pas que l'on puisse contester l'emploi de certains concepts de la langue française (comme ceux d'adaptation, d'anticipation, de prédiction) à la fois dans leur acception transitive désignant un processus actif et dans leur désignation de l'état durable qui résulte de cette action transitive. Dans le premier cas c'est le processus dynamique qui est concerné: le processus adaptatif, l'activité anticipatrice, la prévision comme manifestation d'"intelligence active" (A. Rey, cité par Chatillon, 1985). Dans le second cas, c'est le produit final du processus qui est désigné comme adaptation durable, comme prédisposition anticipatoire, comme prédiction conservée sous forme d'une trace récupérable. Ainsi, le même terme peut désigner la transition d'état qui caractérise un processus actif de fonctionnement du système et le nouvel état final stabilisé qui résulte du processus. Nostradamus prévoyait l'avenir grâce à la mise en jeu d'une opération de son "intelligence active" assimilable à un processus de prévision.



**Figure 1** : Les compartiments cognitifs et sensorimoteurs de traitement de l'information. Ce schéma propose la distinction fonctionnelle entre deux niveaux de traitements (sensorimotor & cognitive processing) de l'information par le système nerveux. Le compartiment sensorimoteur entretient un dialogue direct avec l'environnement (à gauche) soit sous forme d'une réactivité directe (R) des instruments sensorimoteurs aux stimulations externes, soit sous forme de boucles moto-sensorielles. Le compartiment cognitif (à droite) entretient un dialogue interne avec le modèle de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires représentationnelles (representational memory). Deux sorties sont envisagées ici: l'une (ACTION) gérant la motricité par l'intermédiaire des instruments sensorimoteurs et à travers les schémas moteurs résultant des apprentissages (schémata) et inscrits dans les mémoires dispositionnelles (dispositionnal memory). Elle est sous le contrôle des processus intentionnels de sélection (INTENTION). L'autre (EVOCATION) débouche sur les évocations imagées de l'activité mentale dans l'expérience consciente (conscious supervisor). L'accès des informations au compartiment cognitif est filtré par les étages sensorimoteurs et par les schémas perceptifs engrammés dans la mémoire dispositionnelle. Il est contrôlé par les processus attentionnels de sélection (ATTENTION). On notera que le compartiment sensorimoteur dispose d'un processeur adaptatif autonome (adaptive supervisor) capable d'ajuster automatiquement les circuits sensorimoteurs aux contraintes et aux demandes de l'environnement externe et du milieu intérieur sans faire appel aux processus attentionnels (d'après J. Paillard, 1987).

Mais la relation écrite du résultat de cette opération mentale consignée dans ses livres reste une prévision dont le contenu nous reste accessible. De même, l'apprentissage moteur résulte d'un processus actif d'adaptation dont, "l'intelligence active" n'est certainement pas absente, mais aboutit à une habitude motrice stabilisée dont "l'intelligence active" s'est sans doute retirée, mais que l'on continuera de considérer comme une adaptation. On retrouve ici certaines des ambiguïtés du vocabulaire que j'avais déjà autrefois tenté de dénoncer à propos du concept de plasticité et de la dialectique structure-fonctionnement-fonction (voir J. Paillard, 1976a).

Néanmoins le problème soulevé par J.F. Chatillon n'est pas sans importance s'agissant de la dichotomie du prédictif et du réactif lorsqu'on tente de rapprocher cette dichotomie d'une conception hiérarchique des niveaux de contrôle propres aux compartiments sensori-moteur et cognitif.

L'organisme peut, en effet, réagir directement aux sollicitations du monde extérieur en utilisant des montages moteurs tout prêts à fonctionner et qui, de ce point de vue, constituent des prédispositions relativement permanentes et

stables. On trouvera, toutefois à l'origine de ces prédispositions durables des processus d'acquisition de nature variable :

- Le répertoire des réactions génétiquement prédéterminées (éventuellement épigénétiquement révélées) résulte des processus de sélection évolutive.
- Les ajustements automatiques de la circuiterie sensori-motrice relèvent de processus adaptatifs d'origine cérébelleuse n'impliquant pas l'intervention du compartiment cognitif.
- Les apprentissages perceptifs et moteurs, au contraire, mobilisent les ressources attentionnelles et prédictives du système pour leur mise en oeuvre jusqu'à ce qu'un nouveau montage se consolide dans la circuiterie.

Ce dernier devient alors directement déclenchable par la sollicitation sensorielle sur un mode réactif. Il enrichit les mémoires "dispositionnelles" du système (Thomas, 1984) sous forme de prédispositions perceptives (filtres ajustés pour l'accueil sélectif de certaines configurations sensorielles) ou d'automatismes moteurs (réalisant d'emblée la coordination d'une nouvelle configuration de commandes motrices). A cette mémoire **dispositionnelle** stable et durable on opposera une mémoire **représentationnelle** labile et transitoire, vulnérable aux interférences. On retrouve ici l'ancienne distinction bergsonienne entre **habitude** et **mémoire** avec aujourd'hui l'identification des réseaux nerveux différenciés susceptibles d'en rendre compte (Mishkin et Pétri, 1984). On y retrouve aussi la ségrégation entre **mémoire morte** et **mémoire vive** des ordinateurs, cette dernière s'apparentant à ce que les théories psychologiques désignent du nom de "mémoires de travail" (working memory). Ces mémoires de travail vont constituer la matière d'oeuvre des opérations mentales qui sont le substratum de l'activité psychique activement contrôlée par le sujet. C'est à ce type d'activités que les psychologues entendent, je pense, réserver l'appellation d'"activités cognitives". Parmi ces activités, celles, notamment qui sont responsables d'opérations inférentielles vont être reconnues comme traduisant la mise en oeuvre d'un processus actif d'anticipation. Si l'on cherche à caractériser une modalité prédictive par rapport à une modalité réactive de gestion de la motricité il est clair que là première semble devoir impliquer la dynamique d'un opérateur psychique d'inférences tel que le définissent les cognitivistes, alors que la seconde présuppose la disponibilité d'un répertoire stabilisé de prédispositions. Les indicateurs comportementaux de ces modalités de fonctionnement demandent bien entendu à être mieux précisés. Les ressources de la "chronométrie mentale" (Posner, 1978) restent irremplaçables dans les approches psychologiques.

Les psychologues sont d'ailleurs amenés à identifier une variété de manifestations de la prédisposition mentale (mental set) selon qu'elles affectent les entrées sensorielles: attente perceptive (expectation), les sorties motrices: attitude préparatoire (preparatory set) ou certaines opérations transactionnelles entre le stimulus et la réponse (choix de stratégies, planification de l'action) (Requin, 1980). L'empan temporel de ces activités anticipatoires peut également être variable. Il peut aller de la simple extrapolation de trajectoire d'un mouvement en cours jusqu'à l'évaluation des conséquences prévisibles d'une action projetée à plus ou moins long terme, en passant par le calcul de la probabilité de survenue d'un événement attendu. D'une manière générale, tous ces processus d'anticipation sont caractérisés par leur sélectivité d'intervention accordant une priorité d'activation à certains circuits avec exclusion active des activités interférentes. On retrouve là la caractéristique reconnue des processus attentionnels et intentionnels dont la contribution serait nécessairement requise pour le fonctionnement des opérateurs d'inférence prédictive du niveau cognitif. Ce serait par contre l'automatisme, l'absence de charge attentionnelle et l'indifférence aux activités interférentes qui caractériseraient la modalité purement réactive avec le raccourcissement concomitant des temps de traitement de l'information nécessaire au déclenchement de l'action.

Ainsi posé, le problème du réactif et du prédictif devient-il accessible aux approches des Neurosciences et sous quelle forme ? Telle est bien la question que nous souhaitons poser. Pour tenter d'y répondre nous envisagerons tout d'abord sur quelques exemples la façon dont les spécialistes de l'analyse des fonctionnements sensori-moteurs se sont trouvés interpellés par l'intrusion des processus prédictifs du niveau supérieur dans leurs expériences. Nous évoquerons ensuite les données neuroanatomiques et neurophysiologiques récentes qui conduisent à une ségrégation des circuits nerveux impliqués dans les modalités prédictive et réactive du contrôle de l'action. Nous tenterons enfin, de façon purement prospective et inévitablement spéculative dans ce domaine encore insuffisamment exploré par les Neurosciences, d'envisager le profit que les praticiens des activités physiques et sportives pourraient attendre du développement de ce nouveau champ de connaissance.

## 2. L'INTRUSION DU PRÉDICTIF DANS LA RÉACTIVITÉ SENSORI-MOTRICE

Les succès des théories de l'asservissement par contrôle rétroactif (servo-control) et de la modélisation cybernétique des processus de régulation ont suscité un nombre considérable de travaux. Ces travaux ont été, pour la plupart, orientés vers l'identification des fonctions de transfert, c'est-à-dire des opérations formelles permettant de relier les variations des paramètres d'entrée du système (informations visuelles disponibles) à celles des paramètres de sortie (performance motrice).

Cette approche a permis, par exemple, une analyse mathématique élaborée du comportement de poursuite oculo-manuelle à l'aide de mesures quantitatives rigoureuses des signaux visuels d'erreurs de position et de la cinématique des réponses motrices. Les capacités de pistage oculaire ou manuel d'une cible visuelle en mouvement ont, en effet, constitué un champ d'études privilégié des performances de l'opérateur humain.

Cependant, dès les premiers travaux de Stark et al. (1961) sur le pistage oculo-manuel une limitation fondamentale du formalisme de l'asservissement devait apparaître. Dans cette tâche le sujet humain ne se comporte comme un servo-mécanisme réducteur d'écart, conforme à la théorie, que si la trajectoire de la cible à pister est totalement imprévisible. C'est seulement dans cette situation que la fonction de transfert expérimentalement observée est conforme aux données calculées à partir du formalisme mathématique de la théorie des servo-mécanismes. Dès qu'une redondance ou une régularité détectable est introduite dans le mouvement imprimé à la cible le système se délinéarise et semble fonctionner sur un autre mode. Sa dynamique échappe alors à une description mathématique rigoureuse. Autrement dit, ce n'est que lorsque la machinerie sensori-motrice est privée du concours de l'opération de prédiction et se trouve sollicitée sur un mode purement réactif qu'elle se comporte comme un servo-mécanisme banal. Son fonctionnement devient alors analysable en terme d'ingénierie cybernétique.

On comprend, de ce fait, le succès rencontré par ce type d'analyse lorsqu'on l'applique à l'étude de régulations physiologiques autonomes, normalement ou expérimentalement déconnectées des contrôles prédictifs de niveau supérieur. De la même manière s'expliquent les résultats spectaculaires obtenus dans la description de certains comportements d'invertébrés qui

dépendent d'une modalité purement réactive de contrôle. Mais, en contrepartie, la relative défaveur que connaît actuellement ce mode d'approche, notamment lorsqu'on l'applique à l'analyse de la performance humaine, devient plus compréhensible. Cette dernière apparaît, en effet, y compris lorsqu'il s'agit des réactions réflexes les plus élémentaires, toujours plus ou moins "pénétrables" par les contrôles volontaires ou cognitifs. La nature et les mécanismes de cette pénétration commencent à préoccuper sérieusement les neurophysiologistes (Bonnet, 1983 ; Rothwell et al., 1980).

L'étude de la saccade oculaire en offre, de ce point de vue, un exemple illustratif. Le schéma classique du "grasping" fovéal demeure tout à fait valable. La circuiterie colliculaire de ce réflexe est maintenant bien analysée. L'intrusion des processus attentionnels à ce niveau lorsqu'elle fut découverte par Goldberg et Wurtz (1972), apparut comme surprenante. Le transfert de la carte rétinienne des couches superficielles du colliculus à la carte motrice des couches profondes réalise, en effet, une interface sensori-motrice idéale. Or, il est aujourd'hui démontré que cette interface ne fonctionne, en fait, de cette manière directe que dans des conditions très particulières (express saccades). Le contrôle de ces structures par les aires visuelles et pariétales du néocortex et surtout par les aires oculaires frontales fait actuellement l'objet d'une analyse en profondeur. Il apparaît d'ores et déjà que les contrôles frontaux fonctionnent essentiellement en prédictif alors que le colliculus fonctionne en réactif (Schiller et Sandell, 1983). Les saccades spontanées d'exploration s'accompagnent d'une illumination caractéristique des aires motrices supplémentaires dans les enregistrements idéographiques basés sur le débit sanguin local, alors que la saccade réflexe déclenchée par l'apparition d'une cible visuelle ne l'active pas. Une observation récente de Schlag et Schlag (1985) est particulièrement illustrative des perspectives ouvertes par ce champ d'études. Ces auteurs ont identifié chez le chat et le singe en avant de l'aire motrice supplémentaire ce qu'ils ont appelé une aire oculomotrice supplémentaire, distincte de l'aire oculomotrice classique. Les neurones de cette région restent silencieux lors des saccades réflexes et ils ne sont activés que lors des saccades spontanées qu'effectue l'animal placé dans l'obscurité et qui attend l'apparition éventuelle d'un stimulus quelque part sur l'écran. Mais l'observation la plus importante de ces auteurs concerne les effets d'une microstimulation des neurones ainsi repérés comme étant associés à une activité oculomotrice spontanée. Si la stimulation est délivrée alors que l'oeil est immobile on déclenche une saccade dont les caractéristiques d'amplitude et de direction sont rigoureusement fixes. Par contre, si la stimulation est délivrée alors que l'oeil est déjà engagé dans une saccade spontanée, quelle que soit la

direction initiale prise par cette saccade, on voit curieusement sa trajectoire s'incurver sous l'effet de la stimulation pour rejoindre toujours un même point de l'espace (défini dans un référentiel céphalique et non rétinien). Autrement dit, tout se passe comme si l'activité de ce neurone codait le but spatial de la saccade et imposait à l'oeil en mouvement spontané d'atteindre ce but Ce qu'il réalise effectivement suivant des trajectoires variées.

On peut rappeler à ce propos les anciennes observations de Bizzi (1974) sur la coordination oeil-tête dans les conditions d'un appel saccadique de l'oeil en vision périphérique, la tête étant libre de se mouvoir. Ces auteurs démontraient deux faits nouveaux importants : le premier concernait le fait que le mouvement de la tête semblait atteindre sa position finale, non sous l'effet d'un programme de déplacement prescrit en direction et en distance par les commandes motrices centrales, mais comme résultat d'une prescription de l'état final d'équilibre entre muscles antagonistes. Cette prescription s'exprimerait sous forme d'un ajustement de raideur de deux ressorts antagonistes définissant de façon univoque la position finale d'équilibre de leur point d'attache (Bizzi et al., 1976). Ce modèle de prescription d'une position finale des pièces mobiles du squelette, malgré d'intéressants prolongements expérimentaux (spring mass model), n'a, malheureusement, pas reçu jusqu'ici de support définitivement convaincant au plan neurophysiologique. Si les observations de Schlag sur la motricité oculaire peuvent trouver leur équivalent pour la motricité squelettique, le problème pourrait être appelé à connaître de nouveaux développements.

Un second constat des expériences de Bizzi concernait la distribution temporelle des activités oculaires et céphaliques au cours d'une saccade d'acquisition d'une cible périphérique. La situation généralement adoptée pour l'étude des saccades consiste à rendre non prévisible la date d'apparition et la localisation de la cible. Dans ces conditions on observe systématiquement la précession du mouvement de l'oeil sur celui de la tête (20 à 30 ms). La plus grande inertie du massif céphalique suffit à expliquer le retard du mouvement de la tête sur celui de l'oeil en supposant synchrones les commandes motrices initiales dirigées vers les muscles extraoculaires et la musculature nuquale. Par contre, si la cible est attendue dans une position prévisible, on constate que le mouvement de la tête part cette fois avant celui de l'oeil, anticipant en quelque sorte la coordination nécessaire. Bizzi parlait alors d'une modalité prédictive et d'une modalité réflexe de coordination des mouvements de l'oeil et de la tête.

Nous pourrions multiplier les exemples de cette irruption du "prédicatif" dans la plupart des modèles d'analyse habituellement utilisés par les neurophysiologistes pour l'étude des mécanismes sensori-moteurs. L'abondante littérature consacrée actuellement à l'étude des mécanismes de la poursuite oculaire ou oculo-manuelle est désormais clairement orientée vers l'élucidation des modalités d'interaction entre dispositif réflexe d'ajustement du type servo-mécanisme et mécanismes d'anticipation et de prédiction (Eckmiller, 1987).

Les récents travaux de Melvill Jones et al. (1984) en sont un autre exemple. Ils démontrent la possibilité d'obtenir dans l'obscurité et par simple effort mental une recalibration du réflexe oculo-vestibulaire, réflexe dont les mécanismes sensori-moteurs avaient par ailleurs été bien élucidés. Les régulations posturales n'échappent pas à la règle dès lors qu'on les étudie sur l'organisme intact en situation (Droulez et al., 1985). Ainsi le beau travail de Guitton et al. (1986) démontre la contribution des mécanismes de contrôle anticipateur volontaire sur la stabilisation posturale de la tête, alors que la machinerie sensori-motrice stabilisatrice réflexe semble parfaitement adaptée pour assurer cette fonction sans recourir à des contrôles supérieurs.

On peut aussi mentionner les intéressantes recherches de l'équipe de Jean Massion dont on connaît la contribution à l'élucidation des régulations posturales en "feedforward" (Massion, 1984). Cette équipe a étudié les processus d'anticipation associés aux mouvements intentionnels dans le fameux protocole du "garçon de café" où le plateau portant les consommations se trouve inévitablement déséquilibré lorsqu'un consommateur prend l'initiative d'en retirer lui-même la carafe malgré la prévision que peut en faire le garçon, alors que le plateau reste parfaitement stable lorsque son allègement consécutif au soulèvement de la carafe résulte de l'initiative du garçon lui-même. Ce modèle de régulation anticipatrice donne actuellement lieu à des analyses quantitatives précises. Il n'est pas sans intérêt de signaler que cette équipe vient de démontrer l'altération, chez les malades porteurs de lésions unilatérales de l'aire motrice supplémentaire, de ce mécanisme d'anticipation associé au geste intentionnel lorsqu'est utilisé comme segment support le membre contracté à la lésion et comme segment actif le segment ipsilatéral. Ce qui amène à envisager le rôle de cette structure dans la coordination entre posture et mouvement (Massion et al., 1989).

On pourrait encore évoquer le développement récent d'études sur la modulation "cognitive" des automatismes de la locomotion chez

l'Homme (Ferrandez et Pailhous, 1986), mais aussi tous les travaux de neurophysiologie animale sur la modulation des activités corticales par une instruction préalable (Evars et Tanji, 1974) et, d'une manière générale, les approches qui utilisent actuellement le contrôle systématique d'informations préalables (pre-cuing). La pondération variable des probabilités de survenue d'un événement permet de disséquer les mécanismes intervenant dans les prédispositions du système à réagir (Requin, 1985) et de faire apparaître la coopération des modalités prédictive et réactive dans la gestion des activités motrices : sans doute y a-t-il lieu de distinguer ici la prédisposition rigidifiée dans une habitude motrice stabilisée et la prédisposition dynamique transitoire qu'utilisent les processus préparatoires à l'exécution d'un mouvement. Cette dissociation correspond à deux états différenciés du système dont l'étude nous révélera sans doute un aspect important du passage d'un mode contrôlé à un mode automatique de production des actes moteurs, aspect qui constitue une caractéristique importante des processus d'apprentissage moteur.

L'ouverture quasi explosive de ce nouveau champ d'intérêt pour les approches neurobiologiques sera certainement suivie avec attention par le psychologue cognitiviste et par le psychobiologiste dont la vocation a toujours été de promouvoir une approche de l'acte moteur intégré. L'un comme l'autre se retrouvent là sur un terrain familier où leur expertise pourrait être précieuse pour canaliser l'enthousiasme néophyte des neurophysiologistes. Mais, en dernier ressort, les principaux bénéficiaires de ces récents développements pourraient bien être les praticiens de la motricité sous ses divers aspects. Avant d'envisager ces perspectives, il semble important de jeter un regard sur les nouveaux paysages de l'organisation nerveuse que nous révèlent les récents développements des Neurosciences.

### **3. LA DUALITÉ DES CONTRÔLES CORTICAUX DE L'ACTION**

Les techniques d'enregistrement des activités neuronales unitaires sur l'organisme vigile actif ont connu un développement spectaculaire au cours des 15 dernières années. Ce développement a conduit à une moisson de données nouvelles sur les contrôles corticaux de la motricité et sur la contribution des deux grandes boucles striaire (ganglion de la base) et cérébelleuse (cervelet latéral) à la modulation des aires motrices du cortex. Parallèlement, le perfectionnement des méthodes de traçage des voies

nerveuses a précisé l'architecture des grands secteurs associatifs du cerveau et la complexité de leurs interconnexions.

Nous ne retiendrons que les grandes lignes d'une argumentation tirée de ces acquisitions récentes et basée sur des données neuroanatomique, neuropathologique et neurophysiologique tendant à envisager l'évolution des aires motrices corticales suivant deux grands secteurs architecturaux différenciés : dorsomédian d'une part et ventrolatéral d'autre part. Une ségrégation fonctionnelle de ces deux secteurs est aujourd'hui envisagée sur la base de leurs origines phylogénétiques respectives et de la nature des connexions qui les reliait aux secteurs sous-corticaux et aux grandes aires associatives du néocortex. Pour plus de détails à ce sujet on se reportera à l'importante revue publiée par Goldberg en 1985.

Précisons d'abord que la structure laminaire du néocortex présente une modification caractéristique lorsqu'on passe des régions qui sont à l'origine des grandes voies motrices descendantes aux aires associatives qui sont caractérisées par l'abondance de leurs connexions intracorticales et de leurs liaisons réciproques avec les secteurs du thalamus. Les régions motrices ont une structure que l'on qualifie d'agranulaire (dominance des couches III et V) comparée à celle des aires préfrontales qui présentent une extension caractéristique de leurs couches IV à structure typiquement granulaire. Cette caractéristique permet de distinguer clairement en avant de la scissure de Rolando un cortex moteur et prémoteur typiquement agranulaire aux limites franches qui les séparent d'un cortex associatif préfrontal typiquement granulaire.

### **3.1. L'AIRES MOTRICE PRIMAIRE (AIRE 4)**

Jusqu'ici la mieux connue, elle présente une organisation somatotopique caractéristique. Les travaux modernes ont confirmé ici son organisation modulaire en colonnes verticales d'environ 300 microns de diamètre. Le nombre des colonnes consacrées aux contrôles de la main et des structures orolaryngées étant supérieur à celui que l'on trouvera dans les régions contrôlant les membres inférieurs ou la musculature axiale. Ce cortex moteur primaire reste en principe la structure de médiation principale des commandes motrices par les voies pyramidales descendantes.

### **3.2. DEUX VOIES D'ACCÈS AU CORTEX MOTEUR PRIMAIRE**

La conception d'une dualité d'organisation des structures qui contrôlent le cortex moteur primaire repose sur une variété de données convergentes phylogénétique, neuroanatomique, neurophysiologique et fonctionnelle.

#### **3.2.1. Sur le plan phylogénétique**

Les structures néocorticales, dont l'expansion va caractériser le cerveau des mammifères, se développent phylogénétiquement à partir des structures plus archaïques des régions dites limbiques (rhinencéphale). D'après Sanides (1964) les régions frontales dériveraient de deux protogradations bifurquantes dérivées des structures limbiques : l'une se développe à partir de l'hippocampe et de l'aire angulaire antérieure pour constituer les régions dorsomédianes du néocortex frontal (aire motrice supplémentaire, aire prémotrice supérieure, cortex préfrontal associatif dorsomédian) ; l'autre prend son origine dans le cortex piriforme pour bourgeonner les régions ventrolatérales du néocortex frontal (aire prémotrice inférieure, aire motrice préarquée, cortex préfrontal orbitaire et ventrolatéral) (voir figure 2).

#### **3.2.2. Du point de vue neuroanatomique**

Au plan anatomique, ces deux secteurs frontaux se différencient par leurs afférences (les informations qu'ils reçoivent) et leurs voies d'accès au cortex moteur primaire.

Le secteur dorso-médian est sous le contrôle des régions hippocampiennes et reçoit ses informations sensorielles essentiellement de l'aire pariétale 5 (somato-proprioceptive, espace du corps). Il contrôle les dispositifs moteurs de l'aire 4 par l'intermédiaire de l'aire motrice supplémentaire (AMS) (considérée comme une aire supramotrice médiane) et des aires prémotrices supérieures (PMS).

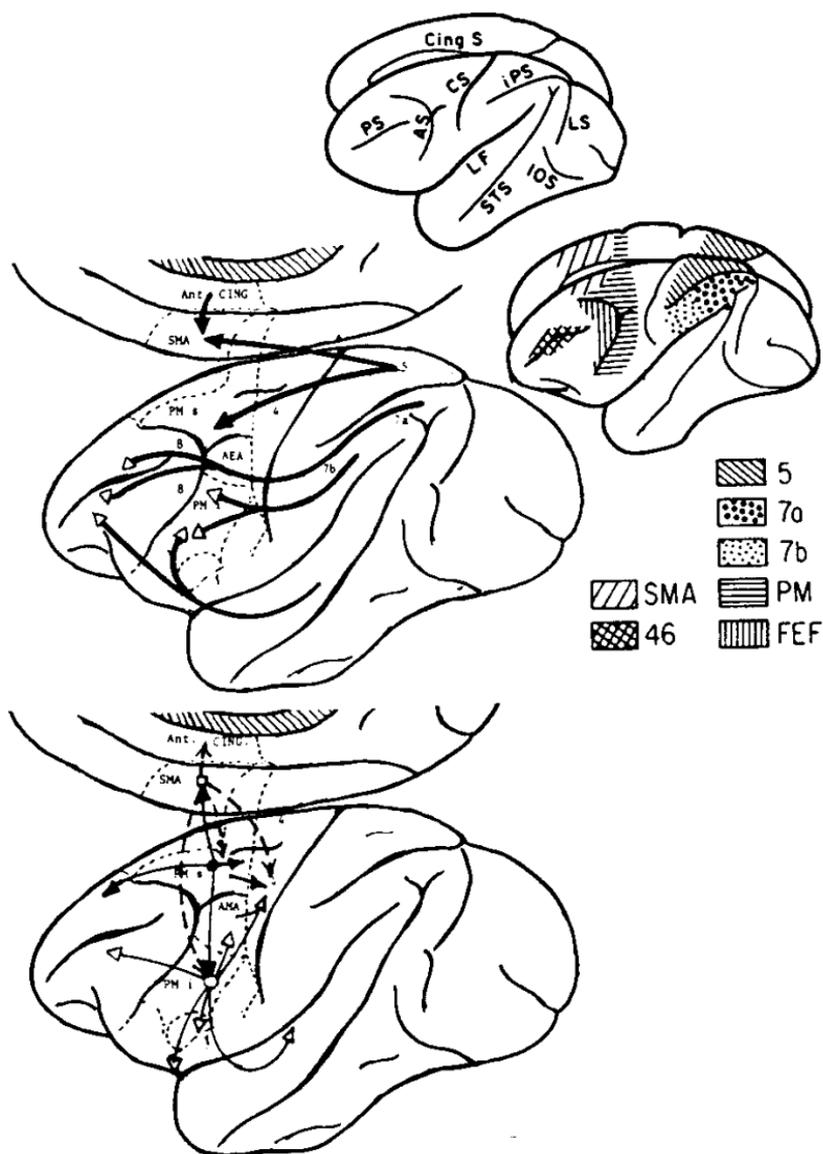
Le secteur ventro-latéral est sous le contrôle des aires associatives pariétales postérieures (7a, 7b) et temporales (STS) et peut être considéré comme une zone de convergence sensorielle multimodale (visuelles, auditives, cutanées, espace extracorporel). Il influence l'aire 4 par l'intermédiaire de l'aire préarquée (APA) (considérée comme une région protomotrice latérale) et les aires prémotrices inférieures.

### **3.2.3. Du point de vue neurophysiologique**

Bien que l'interprétation des données électrophysiologiques sur les activités unitaires de ces régions donne actuellement lieu à certaines controverses, les auteurs s'accordent à attribuer aux activités des régions prémotrices le label de "préparatoire" ; de "set related neurones" (Wise, 1985). L'activité de ces neurones, liée à la tâche et éventuellement à la direction du but à atteindre, précède celles des neurones de l'aire 4 qui sont "movement related" liés aux paramètres du mouvement à exécuter et aux prescriptions de direction, de force, d'amplitude, de vitesse. De ce point de vue une importante distinction est introduite entre les neurones dont l'activité est déclenchée par un stimulus externe identifiable (stimulus-driven, data-driven) et ceux dont l'activité semble d'origine endogène (memory-driven), dans les mouvements déclenchés spontanément par exemple. La comparaison entre mouvement initialisé par un signal déclenchant et mouvement spontané constitue une voie d'approche privilégiée dans l'expérimentation actuelle sur les primates et l'Homme (Gemba et Sasaki, 1984 ; Okano et Tanji, 1987 ; Romo et Schultz, 1987). Sans entrer ici dans le détail des nombreux travaux actuellement orientés sur cette thématique (voir en particulier la revue de Goldberg, 1984) nous retiendrons qu'ils posent explicitement l'hypothèse d'une ségrégation fonctionnelle entre deux modalités prédictive et réactive de gestion des mouvements organisés à partir du cortex moteur.

### **3.2.4. Du point de vue fonctionnel**

Une telle hypothèse se trouve corroborée par les expériences de stimulation et de lésion chez les primates. Elle trouve aussi un support sérieux dans les données de la neuropathologie humaine. Elle vient également de bénéficier des données récentes de l'imagerie cérébrale (idéographie) basée sur l'utilisation d'indicateurs métaboliques (voir Goldberg (1985) et Paillard (1987b)). Là encore, et au risque de schématiser tant soit peu les données actuelles encore éparées, parfois discutables ou demandant confirmation, on retiendra quelques données particulièrement significatives de ce courant de recherches en plein développement.



**Figure 2** : Schéma des principales connexions afférentes et efférentes des cortex prémoteurs. En haut à droite. (Figure supérieure). Rappel des principaux sillons du cerveau de singe : cingulaire (Cing S) ; central (C.S) correspondant à Rolando chez l'Homme ; latéral (LF) correspond à Sylvius ; principal (PS) correspondant à l'aire 46 ; arqué (AS) ; intrapariétal (IPS) ; lunaire (L.S.) ; temporal supérieur (STS) ; occipital inférieur (IOS). (Figure inférieure). Répartition géographique des aires 5, 7a, 7b, prémotrices, oculomotrice frontale (FEF) et motrice supplémentaire (SMA). A gauche. (schéma du haut). Afférences du cortex prémoteur où l'on distingue clairement d'une part l'origine cingulaire antérieure (Cing) et pariétale (Par) (aire 5) des informations qui convergent sur la SMA et l'aire prémotrice (Pms) (flèches noires) ; d'autre part les projections originaires du cortex pariétal inférieur (7a, 7b) et du lobe temporal supérieur (Temp.) sur l'aire prémotrice inférieure (PMi) et préarquée (APA). A gauche (schéma du bas). Efférence de l'aire prémotrice supérieure (PMs) et inférieure (PMi) montrant la ségrégation des informations qui se distribuent principalement sur les régions frontales dorso-médianes pour la première et frontales ventrolatérales pour la seconde. Ces deux régions convergeant dans la voie finale commune que constitue l'aire motrice primaire (4). (D'après Barbas et Pandya, 1984, cité dans Goldberg, 1984).

On peut évoquer, tout d'abord, la fameuse observation de Moll et Kuypers (1977) sur des singes placés dans une situation où, voyant la cible convoitée à travers une paroi translucide, ils ne pouvaient l'atteindre qu'en empruntant un trou latéral aménagé dans la paroi et en adoptant une stratégie de détour. La lésion de l'aire supplémentaire associée à celle des aires prémotrices supérieures conduit à l'incapacité totale pour l'animal d'adopter la conduite de détour. Il paraît, en outre, incapable d'inhiber une projection directe irrépressible de sa main vers la cible, aboutissant ainsi à une série de collisions avec la paroi, ce que les auteurs interprètent comme une libération de la réactivité directe. Nombreuses sont aujourd'hui les données qui corroborent l'hypothèse d'une intervention des aires supplémentaires dans la production de mouvements intentionnels, guidés par un modèle interne et relevant d'une planification stratégique, données qui soulignent aussi l'intervention majeure de ces structures dans le contrôle inhibiteur de la réactivité directe aux stimulations d'origine exogène. La conduite de détour adoptée par les singes de Kuypers exige assurément cette anticipation de l'action d'où découle l'élaboration d'une stratégie particulière qui ne peut être efficacement réalisée que si la réponse balistique de transport du membre en direction de la cible localisée visuellement est activement réprimée.

L'épreuve de la commande oculaire antisaccadique constitue un second exemple du même phénomène observable chez l'Homme cette fois.

Initialement proposée par Hallett (1978) l'épreuve consiste à demander au sujet qui attend, le regard stabilisé sur un point de fixation, la présentation d'un signal périphérique. Il a pour consigne d'ignorer ce signal et de produire une saccade oculaire volontaire en direction opposée vers une cible virtuelle occupant une position symétrique de celle du signal présenté. Cette tâche est toujours parfaitement réussie par les sujets normaux qui présentent toutefois un délai de déclenchement de l'antisaccade nettement plus élevé que le temps de réaction normalement observé pour l'acquisition fovéale directe d'une cible lumineuse présentée périphériquement. Guitton et al. (1985) ont montré que les patients atteints de lésions des secteurs préfrontaux dorsomédians sont incapables de réussir l'épreuve et présentent un appel saccadique irrépressible vers la cible visuelle réelle.

D'une manière générale la gestion d'une activité dirigée vers un objectif spatial est différenciellement affectée par les lésions corticales suivant que le but de l'action est physiquement présent et accessible sensoriellement ou que l'objectif est simplement mémorisé (Evarts et al., 1984).

L'observation chez des malades présentant une lésion de l'aire motrice supplémentaire d'une incapacité de produire un discours verbal spontané (mutisme), mais de la capacité de répondre correctement aux questions qu'on lui pose, ressort d'une interprétation similaire et montre la généralité de cette dissociation (Damasio et Van Hoesen, 1980).

La distractibilité caractéristique du syndrome frontal chez l'Homme, également observable chez les primates après lésions préfrontales, traduit la libération des systèmes de réactivité directe qui amène l'organisme à répondre de façon irrépressible à toutes les sollicitations exogènes. A l'inverse les phénomènes de négligence consécutifs à des lésions préfrontales traduisent l'impossibilité pour l'organisme de réagir attentionnellement aux stimulations en provenance de l'hémispace contralatéral à la lésion.

On citera aussi la description d'une héli-akinésie par perte d'initiative motrice consécutive à des lésions unilatérales des noyaux associatifs du thalamus chez des malades qui néanmoins peuvent mobiliser le membre inactif sur sollicitation impérative de l'observateur (Laplaine et al., 1984).

On rapprochera encore de cette dichotomie fonctionnelle le comportement des malades atteints d'apraxie idéo-motrice incapables de mobiliser leur membre pour exécuter sur demande de l'observateur un geste symbolique familier (signe de croix par exemple) c'est-à-dire dans une situation qui exige représentation du but et anticipation du mouvement à réaliser, alors que ce même geste sera automatiquement déclenché lorsque le sujet entre

dans une église où la configuration des stimulations habituelles suffit à mobiliser le geste en réactivité directe (voir Paillard, 1982).

On pourrait ici multiplier les exemples et montrer en particulier que toute action intentionnellement déclenchée ressort d'une médiation représentationnelle du but à atteindre et implique par suite une forme d'anticipation des conséquences sensorielles attendues de l'exécution effective du geste projeté.

De ce point de vue, nous avons pu nous-même observer un phénomène intéressant à l'occasion d'une expérience de synchronisation de mouvement réalisée chez l'Homme (Paillard, 1948 ; expérience que nous venons récemment de répliquer avec C. Bard, 1989).

Il est demandé au sujet dans cette expérience de déclencher simultanément un mouvement de l'index et du pied. Les réponses produites se groupent généralement suivant une distribution qui se situe à l'intérieur d'une zone où le sujet est perceptivement incapable d'évaluer la non simultanément de deux chocs cutanés donnés respectivement à la main et au pied (voir figure 3).

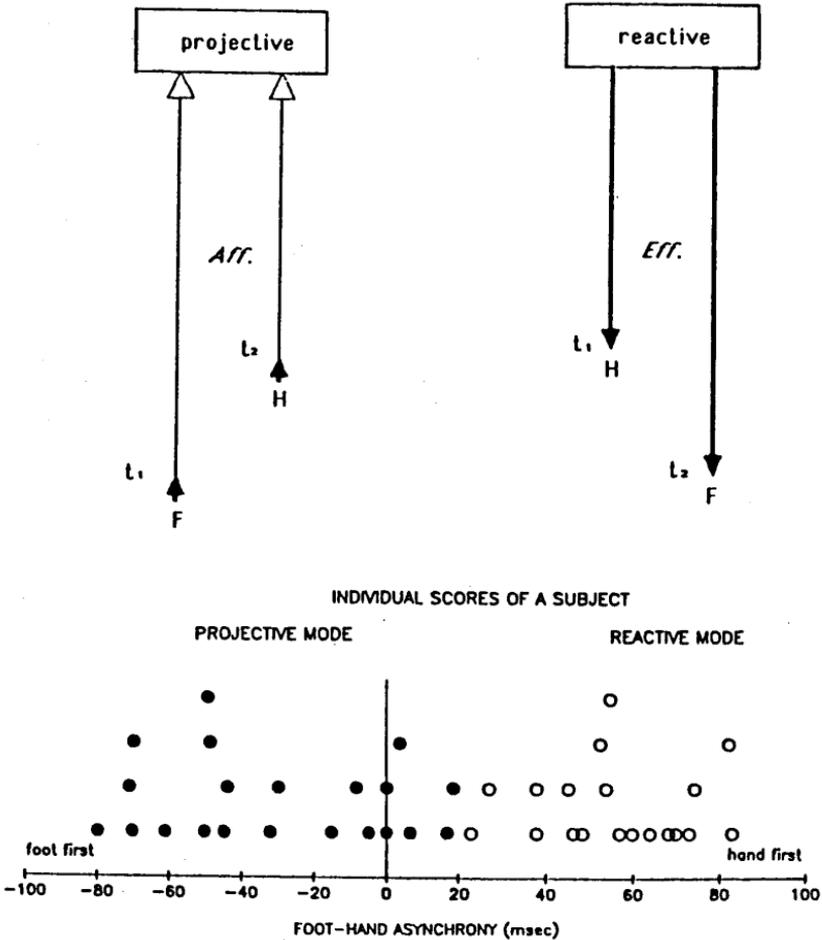
L'écart-type de telles distributions est étonnamment faible comparé à la largeur de la zone d'incertitude perceptive, ce qui tend à montrer que la commande motrice des mouvements synchronisés est nettement plus précise que celle qui serait attendue d'un recours à une évaluation basée sur une expérience perceptive de la simultanément. En fait, c'est bien ce que l'on observe lorsqu'on demande aux sujets de réagir simultanément de l'index et du pied, et le plus rapidement possible, à un signal délivré de façon imprévisible, en situation classique de temps de réaction. Le décalage temporel observé entre le mouvement de l'index et celui du pied correspond très précisément aux délais observables lorsqu'on mesure ce temps de réaction isolément pour la main et pour le pied. Autrement dit, tout se passe ici comme si la consigne de simultanément requise du sujet l'amenait à déclencher, au même moment, dès la détection du signal à réagir, la commande de la main et celle du pied ; d'où la distribution observée avec précession attendue de la main sur le pied et une dispersion reflétant davantage la dispersion des latences du temps de réaction que l'imprécision d'une évaluation perceptive de simultanément.

Une question intéressante se posait alors : qu'en est-il du comportement des sujets si l'instruction est non plus de **réagir** le plus rapidement possible et simultanément de la main et du pied à l'apparition du signal de déclenchement mais de **déclencher spontanément** un mouvement synchrone de la main et du pied. On constate alors que, paradoxalement, c'est le mouvement du pied qui précède celui de la main.

La distribution des essais, bien que plus dispersée que celle des essais réalisés dans la modalité réactive, reste néanmoins très à l'intérieur de la zone d'incertitude perceptive pour l'évaluation sensorielle d'une non-simultanéité. L'interprétation qui s'impose est que la commande synchronisée en modalité spontanée (et nous devrions dire ici en modalité prédictive) opère un subtil décalage temporel des commandes centrales de manière à assurer le retour synchrone des informations sensorielles engendrées par les mouvements respectifs de la main et du pied. Ces informations mettant plus de temps pour revenir du pied que de la main c'est donc le mouvement du pied qui doit précéder celui de la main. Si l'on ajoute que ce décalage paradoxal des commandes centrales est observé dès les premiers essais et ne résulte apparemment pas d'un ajustement progressif par correction d'un essai à l'autre on est amené à considérer que la commande volontaire prédictive dispose d'un étonnant instrument d'anticipation des conséquences sensorielles de l'action projetée pour opérer le décalage temporel requis entre les deux commandes motrices descendantes, afin d'assurer le retour synchrone des informations engendrées par les deux mouvements périphériques. Ces données appellent bien entendu de nouvelles investigations afin d'affiner les hypothèses sur les structures nerveuses impliquées et la nature des mécanismes susceptibles de rendre compte de cette incomparable maîtrise que possède le système nerveux de la dimension corporelle des activités qu'il contrôle. Mais on retiendra ici, pour notre propos, cette démonstration supplémentaire de l'existence de deux modes différents **réactif** et **prédictif** de gestion de la motricité.

#### 4. DEUX BOUCLES MODULATRICES DES ACTIVITÉS DU CORTEX MOTEUR

La complémentarité des deux grandes boucles cortico-ponto-cérébello-thalamo-corticale d'une part et cortico-strio-thalamo-corticale modulatrice des activités du cortex moteur d'autre part est connue depuis longtemps. Leur étude vient de bénéficier d'importants progrès des méthodes d'exploration neuroanatomique et microphysiologique. Se sont notamment précisées les types d'intervention de ces deux boucles sur les structures motrices corticales. Plus encore, en négligeant certaines nuances toujours en discussion dans les journaux actuels, on peut schématiquement considérer les points suivants (voir étude dans Paillard, sous presse).



**Figure 3 :** Distribution des écarts entre commande motrice d'un mouvement synchrone de relèvement de l'index et du talon droits en mode réactif et projectif. Le sujet répondant le plus rapidement possible à un signal impératif en modalité réactive et il déclenche spontanément ses deux mouvements simultanés en modalité projective. On notera la précession de la main en réactif et celle du pied en prédictif. Ces deux distributions se situent à l'intérieur d'une zone d'incertitude à l'intérieur de laquelle le sujet ne peut perceptivement évaluer la non simultanéité des informations en provenance du pied et de la main. Les schémas présentés en haut de la figure représentent l'hypothèse interprétative selon laquelle le mode réactif supposerait un déclenchement synchrone de la commande au niveau du cortex moteur avec une précession ( $t_1$ ) observée de la main (H) sur le pied ( $t_2$ )(F) correspondant aux délais de conduction dans les voies efférentes (Eff) ; le mode projectif, par contre, où le mouvement du pied (F) précède ( $t_1$ ) la main (H)( $t_2$ ) correspondrait à une commande motrice élaborée en vue d'obtenir le retour synchrone des informations périphériques sur l'exécution du mouvement. Le délai observé entre le mouvement du pied et celui de la main tiendrait alors compte des différences de conduction dans les voies afférentes (Aff.). (Commentaires dans le texte d'après J. Paillard et al., 1989).

#### 4.1. LA BOUCLE NÉOCÉRÉBELLEUSE

Elle est principalement alimentée par les activités du cortex moteur primaire et par les secteurs de l'aire prémotrice inférieure. Or, ce sont précisément ces deux régions qui vont constituer la zone de projection essentielle des informations originaires du cervelet latéral par le canal des noyaux thalamiques ventro-latéraux. Mais cette boucle est également alimentée par un important contingent en provenance du cortex pariétal postérieur. Ces zones cortico-cérébelleuses d'origine pariétale sont aujourd'hui considérées comme jouant un rôle essentiel dans le guidage visuel de l'action (Glickstein et May, 1982), c'est-à-dire dans la correction en feedback des erreurs de position en vision centrale (ajustement terminal du positionnement de la main sur l'objectif, par exemple, ou poursuite oculo-manuelle lente d'une cible en mouvement) ou la rectification rapide des erreurs de direction en vision périphérique (en particulier correction initiale de trajectoire d'un mouvement de projection du membre vers une cible visuelle). On trouvera dans Paillard et Amblard (1985) certains développements récents relatifs à ces contrôles en feedback. Mais on retiendra principalement ici que les opérations de guidage "réactif", notamment visuel, du mouvement en cours impliquent très directement la boucle cérébelleuse de régulation et ses actions modulatrices sur les secteurs prémoteurs inférieurs et sur l'aire 4 (voir figure 2). Toutefois c'est davantage la symptomatologie liée aux lésions pariétales (ataxie optique) plus que celle associée à l'interruption des voies cérébello-corticales (dysmétrie) qui semble la plus directement liée aux perturbations comportementales du guidage visuel de l'action. Deux points peuvent être rappelés ici :

- 1) l'importance des projections cortico-corticales unissant directement le cortex pariétal inféro-postérieur aux secteurs prémoteurs ventro-latéraux,
- 2) l'intervention de la boucle cérébelleuse dans l'initialisation rapide des mouvements en réponse à un signal (Wiesendanger et al., 1979).

#### 4.2. LA BOUCLE STRIAIRE

La boucle striaire qui emprunte les importantes formations des ganglions de la base est longtemps restée mal connue au plan de l'organisation de sa microcircuiterie comme au plan de sa physiologie. L'idée d'une confluence de la voie de sortie pallidale avec la voie cérébello-corticale au niveau des noyaux ventrolatéraux de relais thalamique a longtemps été considérée

Comme acquise. La pathologie striaire se ramenait aux manifestations du Parkinson et à certaines classes de mouvements anormaux. Le paysage architectural et fonctionnel des ganglions de la base s'est considérablement modifié au cours de la dernière décennie.

#### 4.2.1. Du point de vue neuroanatomique (voir figure 4)

On est amené à distinguer une pluralité de boucles cortico-striato-corticales se regroupant en deux grandes classes (Alexander et al., 1986) :

- **a) les boucles motrices** qui empruntent essentiellement les structures du putamen et la voie de sortie du pallidum pour faire relais dans un noyau thalamique indépendant du ventrolatéral (VPLO) dont les efférences se projettent massivement non pas directement sur le cortex moteur primaire et les aires prémotrices inférieures, comme c'est le cas pour la voie cérébello-corticale, comme nous venons de le voir, mais sur l'aire motrice supplémentaire et les secteurs prémoteurs dorso-médians.

Ces boucles motrices sont alimentées d'une part par l'ensemble des aires prémotrices et d'autre part par l'aire motrice primaire et l'aire frontale oculaire (aire 8) qui projette dans une boucle indépendante propre à la gestion de la motricité oculaire. Elles sont également alimentées au niveau du putamen par des informations en provenance des aires associatives pariétales et du système limbique.

- **b) Les boucles dites complexes** constituent un ensemble de circuits empruntant pour la plupart les structures néostriaires (noyaux caudés) et les voies de sorties pallidales et nigrales. Elles s'individualisent au niveau de relais thalamiques indépendants et se referment au niveau du cortex préfrontal sur les aires de départ. Suivant leur organisation ces diverses boucles seront alimentées au niveau du noyau caudé par des informations en provenance du système limbique et en provenance des grands secteurs associatifs pariétaux et temporaux.

#### 4.2.2. Du point de vue fonctionnel

Nous ne disposons pas encore de données physiologiques assez précises quant aux spécialisations fonctionnelles des diverses boucles maintenant bien identifiées au plan neuroanatomique. Quelques directions générales peuvent néanmoins être retenues, dans l'état actuel de nos connaissances, pour orienter l'interprétation du rôle fonctionnel des ganglions de la base dans la gestion des actes moteurs (Paillard, 1982).



**Figure 4** : Schéma simplifié des circuits nerveux impliqués dans la gestion prédictive ou réactive des activités motrices. Les diverses opérations mises en jeu intéressent (à droite sur le schéma) : **Le compartiment d'exécution** (exécute) où les commandes élaborées au niveau cortical (MOTOR CX) et dans les logiques câblées du tronc cérébral (BRAIN STEM) s'expriment sur les servo-moteurs (servo-motor) du niveau spinal générateur des actions musculaires (MVT). Ces structures bénéficient de l'assistance des rétroactions sensorielles d'origine périphérique réafférentes (reaff.) ou exafférentes (exaff.). Le cervelet intermédiaire (interm cb.) intervient en parallèle par deux boucles de régulations l'une (4) se fermant sur le cortex moteur et l'autre (5) sur les structures du tronc cérébral qui assistent le mouvement en cours d'exécution. Le **compartiment de programmation (PROGRAM)** essentiellement constitué par la boucle néocérébelleuse (3) qui par la voie du cervelet latéral (latéral cb.) projette essentiellement sur le cortex prémoteur inférieur (PMi) et l'aire post arquée (APA). Le **compartiment de planification (PLAN)** s'articule sur les ganglions de la base (BASAL GANGLIA) et comprend deux classes de boucles régulatrices : les boucles motrices (1) qui relient le putamen (Putamen) aux aires motrices supplémentaires (SMA) et au cortex prémoteur supérieur (PMs) et les boucles cognitives (2) qui associent le noyau caudé (Caudate) aux structures associatives préfrontales (FR). Le **compartiment d'initialisation intentionnelle (INTEND)** de l'action intéressé l'ensemble des cortex associatifs frontaux (Fr), pariétaux (Par.) et temporaux (Temp.) alimentés par les activités des structures limbiques (Limbic) et les noyaux sensoriels et associatifs du Thalamus (Thal). **Les activités prédictives** impliqueraient préférentiellement les secteurs hachurés du schéma : secteurs dorso-médian frontaux (Fr), aire 5 du cortex pariétal (Par.), les ganglions de la base, l'aire motrice supplémentaire (SMA) et le cortex prémoteur supérieur (PMs). **Les activités réactives** emprunteraient de manière privilégiée la voie du cortex prémoteur inférieur (PMi) alimentée par les aires 7a et 7b du cortex pariétal inférieur, les secteurs ventrolatéraux du cortex préfrontal et les régions temporales. La boucle néocérébelleuse (3) est directement impliquée dans le guidage rétroactif de l'action en cours, notamment grâce aux informations visuelles en provenance du cortex pariétal (6). (Modifié d'après J. Paillard, 1982).

Une observation expérimentale chez les primates, et confirmée chez l'Homme, nous aidera à préciser ce point. Une lésion du pallidum qui constitue, comme nous l'avons vu, la voie de sortie des diverses boucles striaires et la structure de distribution de leurs influences sur une variété de noyaux thalamiques différenciés (assurant leur projection sur les secteurs frontaux du cortex en des régions topographiquement spécifiées) rend la performance de l'animal entièrement dépendante d'un guidage sensoriel

continu de la trajectoire des mouvements spatialement dirigés (Hore et al., 1977). Après pallidotomie la phase rapide de transport d'un geste de pointage ne peut plus être normalement mobilisée sous sa forme balistique préprogrammée, le mouvement est cependant effectué correctement mais avec lenteur du fait de la nécessité d'un contrôle visuel continu (Beaubaton et al., 1981). Le parkinsonien présente le même type d'altération de ses gestes qui ne peuvent plus être correctement planifiés et anticipés, mais qui peuvent être exécutés sous le contrôle continu des feedbacks visuels exigeant beaucoup plus de temps pour leur réalisation correcte. Ces mouvements sont pratiquement impossibles à exécuter en l'absence de vision directe du segment activé (Flowers, 1976).

Ces données concordantes tendent à impliquer les boucles striaires dans les opérations d'anticipation nécessaires à la planification correcte d'un projet de mouvement. Leurs lésions laissent, par contre, apparemment intactes les capacités d'un guidage du mouvement en modalité réactive (par feedback et corrections continues des erreurs).

Un autre aspect caractéristique de ces lésions concerne la difficulté qu'éprouvent les patients ou les animaux à changer de stratégies ou à organiser une suite séquentielle de mouvements successifs. Ces perturbations relèvent des phénomènes de persévération souvent décrits comme caractéristiques de la symptomatologie frontale.

Sans pouvoir encore clairement dissocier les contributions respectives des boucles motrices et des boucles complexes dans les troubles observés on peut avancer que les ganglions de la base, en relation étroite avec les secteurs associatifs préfrontaux, interviennent dans la structuration des activités motrices engagées dans la poursuite d'un projet élaboré au niveau cognitif. La conception du but suppose la prise en considération des motifs, intérêts, désirs du sujet et par suite l'intervention des structures limbiques. La réalisation de ce but suppose l'élaboration d'un plan d'action et le choix d'une stratégie motrice en accord avec le contexte visuel de la situation (cortex pariétal postérieur), le contexte postural de l'état du corps et de la position initiale des membres à mobiliser (cortex pariétal supérieur (aire 5), antérieur (aire 7b)). Toutes ces informations, nous l'avons vu, convergent sur les ganglions de la base où ils alimentent les diverses boucles qui opèrent sur les aires préfrontales. Les neurones du putamen (boucles motrices) voient leurs activités qualifiées de "task related", c'est-à-dire en relation avec la signification du but fixé à l'action et non "movement related" c'est-à-dire définissant les prescriptions d'un programme d'exécution.

Ces caractéristiques sont bien celles que nous allons retrouver dans les activités "set related" des aires prémotrices sur lesquelles projettent les boucles striaires motrices. Nous n'évoquerons pas ici le rôle des structures basales (dont la substance noire) dans la mobilisation directe des montages moteurs mésencéphaliques sans emprunter le détour des structures motrices corticales. Elles représentent l'une des voies primitives de gestion de la motricité à partir des influences endogènes d'ordre pulsionnel ou affectif associées aux comportements fondamentaux (faim, soif, sexe, agression, etc.), où interviennent les structures septo-hippocampiques des régions limbiques. C'est au niveau de ces régions que l'on trouve probablement les formes les plus primitives d'une gestion de la motricité basée sur la satisfaction d'un besoin et qui oriente toute l'activité en vue de la réalisation d'un but. Ces mécanismes primitifs, à n'en pas douter, préfigurent les formes plus élaborées de la conception cognitive des projets d'action auquel le développement des secteurs associatifs frontaux permettra l'accès (Goldman Rakic, 1988). D'où l'intérêt des travaux actuels sur les régions septo-hippocampiques et sur le rôle qu'elles sont amenées à jouer dans la modalité prédictive de contrôle de l'action en association avec le complexe des boucles fronto-striaires. Ces dernières réalisent une véritable structure d'interface entre le "cerveau émotif" et le "cerveau cognitif" (Konorski, 1967) pour la mobilisation des commandes motrices de l'aire 4 par la voie de l'aire supplémentaire et des aires prémotrices dorso-médianes (Damasio et al., 1981).

L'exécution et le bon déroulement ultérieur des programmes d'action ainsi mobilisés sont ensuite confiés aux régulations rétroactives des structures cérébelleuses et aux servo-régulations du tronc cérébral et de la moelle.

## 5. PERSPECTIVES PRATIQUES

Les motivations initiales de cet exposé et le choix de ce thème, nous l'avons rappelé dès le départ, tenaient au constat d'un accès récent des Neurosciences à toute une série de problèmes jusqu'ici à peu près totalement ignorés par les approches analytiques traditionnelles. Ce que nous avons appelé "l'intrusion du prédictif" dans la machine bien rodée de la circuiterie nerveuse des fonctions sensori-motrices marque, en effet, une ouverture importante. Cette intrusion, désormais, interpelle le neurobiologiste sur un terrain dont, jusqu'ici, les psychologues cognitivistes étaient à peu près seuls à tenter l'exploration. Cette convergence interdisciplinaire me paraît porteuse d'un espoir de progrès dans ce champ de connaissance. Les éducateurs physiques et les entraîneurs, de leur côté, doivent toujours

demeurer attentifs à ces progrès et tenter d'en faire leur profit dans leur propre champ de préoccupation (Ripoll, 1989). De ce point de vue, trois ordres de questions me paraissent découler de cet exposé concernant respectivement : a) le statut des opérateurs de prédiction ; b) la prise en compte des typologies réactionnelles et des différences individuelles dans les options pédagogiques ; c) la prise en considération de la dualité des modes de gestion de la motricité dans une taxonomie des APS.

### **5.1. OPÉRATEURS DE PRÉDICTION**

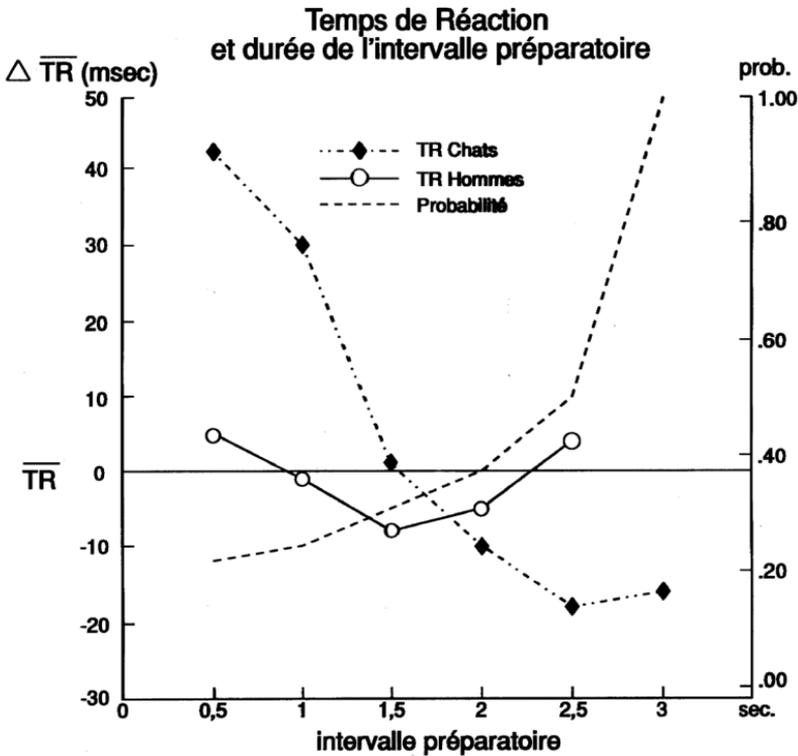
Un premier sujet de réflexion concerne sans doute l'étonnante efficacité des opérateurs de prédiction qui travaillent sur la dimension temporelle des comportements moteurs. De toute évidence, cette efficacité intrinsèque ne semble pas relever d'une capacité acquise, perfectionnable par l'exercice, mais bien d'une propriété basale du fonctionnement nerveux que l'on retrouve présente sous une forme primitive chez toutes les espèces animales. L'appareil cognitif des vertébrés supérieurs acquiert probablement des capacités nouvelles importantes dans sa maîtrise du futur (Fuster, 1985) et son appétit d'invariance et d'intelligibilité oriente la plupart de ses activités. L'une des caractéristiques importantes du cerveau humain est que le moteur d'inférence cognitive dont il est doté est en permanence à la recherche de matériaux informationnels assimilables. L'attraction qu'exercent sur l'Homme les configurations aléatoires d'éléments colorés (peinture abstraite) ou sa fascination devant les mouvements imprévisibles des mobiles de Calder traduisent la sollicitation de ce moteur d'inférence en quête permanente d'intelligibilité. Cette recherche impérieuse peut d'ailleurs le conduire à construire des arrangements perceptifs imaginaires ou à établir des relations causales illusoire qui satisfont son besoin de cohérence. Les mythes et les croyances jalonnent l'histoire de l'humanité et témoignent des propriétés singulières que le cerveau humain doit au développement de cette machine cognitive inférentielle dont le pouvoir de projection dans l'avenir va en faire un instrument privilégié de pilotage de la machinerie sensori-motrice. C'est à cette capacité que le cerveau devra aussi sa remarquable aptitude à extraire du chaos des informations fluctuantes qui bombardent ses organes des sens et, en particulier, des transformations du champ de ses afférences qui résultent de ses mouvements propres les covariances et les régularités dont émerge la représentation interne d'un univers perceptif

Stable et cohérent où peuvent s'engager des dialogues sensori-moteurs comportementalement efficaces et biologiquement significants.

C'est cette propriété également qui fait de l'acte perceptif (à la différence des informations sensorielles distribuées et traitées dans les étages sensori-moteurs du système) un processus actif d'hypothèses projetées sur le monde extérieur et en attente de confirmation (Gregory, 1972).

Dès lors la manière dont ce nouvel instrument cérébral d'inférences prédictives interagit, coopère ou interfère avec les dispositifs nerveux archaïques d'extractions automatiques de régularités temporelles et de calcul de probabilité d'occurrence, telle que nous les voyons déjà à l'oeuvre dans les organisations vivantes primitives, mérite d'être posée.

Je rappellerai à ce sujet une observation que nous avons été amenés à faire avec Sylvie Requin voici quelques années dans notre laboratoire à propos d'une expérimentation de temps de réaction chez le chat (Nysenbaum-Requin et Paillard, 1966). La mesure du temps de réponse de l'animal à un signal impératif (sonore par exemple) exige pour son optimisation la mobilisation de l'attention de l'animal (par un signal préparatoire, par exemple). Dans cette expérience, l'animal déclenchait lui-même la production du signal impératif en pressant une pédale. Le délai séparant l'appui du signal impératif doit être modifié de manière aléatoire afin d'éviter que l'animal puisse prévoir le moment d'apparition du signal impératif et, de ce fait, être capable d'anticiper sa réponse. Il est donc classique d'utiliser une série de délais variables (en l'occurrence 6 dans l'expérience précitée s'étalant entre 0,5 et 3 sec). Or ayant tout d'abord adopté une simple distribution aléatoire des différents délais contrôlés, comme il est habituel de le faire en expérimentation humaine, nous eûmes la surprise de voir les TR des animaux se raccourcir de façon systématique avec l'allongement des délais. La courbe de distribution des TR en fonction de la durée du délai séparant le signal préparatoire du signal impératif présentait une relation évidente avec la courbe de probabilité d'occurrence du signal de réponse (voir figure 5). L'interprétation de ces résultats était bien entendu triviale : la probabilité d'apparition du signal impératif s'accroît avec l'écoulement du temps. Elle est évidemment plus grande après un long délai qu'après un délai court. Au-delà d'une durée supérieure à celle de l'avant dernier délai, la probabilité d'apparition du signal impératif devient égale à l'unité. Moins trivial par contre était le constat de l'étonnante précision de l'instrument de traitement des probabilités dont l'animal semble doté. Il fallut, dès lors, recourir à des distributions particulières des délais (séries exhaustives à distribution de Poisson) (Durup, 1967) assurant le meilleur équilibrage possible des probabilités d'occurrence du signal impératif pour obtenir finalement des TR homogènes pour les différents délais.



**Figure 5 :** Evolution du temps de réaction (en ordonnées et en ms) en fonction de la durée de l'intervalle préparatoire (en abscisses et en sec.). **En traits pleins.** Résultats d'une expérience effectuée chez le chat (d'après Nysembaum-Requin S. et Paillard J., 1966) utilisant 6 intervalles entre 0,5 et 3 sec distribués aléatoirement. On note le raccourcissement systématique du TR (cercles) avec l'augmentation du délai préparatoire qui reflète fidèlement le décours de la courbe théorique de probabilité d'occurrence du signal impératif (courbe en pointillé). **En tirets.** Résultats d'une expérience similaire chez l'Homme (triangle) effectuée dans des conditions équivalentes mais avec 5 délais seulement (d'après Woodrow, 1914) indiquant l'ancrage stratégique sur le délai moyen avec absence d'influence de la probabilité d'occurrence du signal de réponse.

Alertés par ce problème nous eûmes ensuite l'occasion de constater que le singe semblait moins sensible que le chat à cet effet, et l'Homme, curieusement, encore beaucoup moins puisque l'on peut se contenter d'une distribution aléatoire simple des délais, dans les études classiques du temps de réaction, sans observer le biais probabiliste des résultats obtenus chez le chat. Une hypothèse d'interprétation est que le développement des opérateurs d'inférence cognitive qui accompagne l'accroissement des

secteurs associatifs corticaux chez les primates, et au plus haut point chez l'Homme, tendrait à imposer leur emprise sur les mécanismes plus primitifs. Ils masqueraient donc les capacités de calcul automatique du système en inférant des hypothèses cognitives, plus ou moins efficaces d'ailleurs, relevant souvent du pari, parfois même de la détection de régularités illusoire ou de la déduction erronée de règles hypothétiques. Autrement dit, l'appareil cognitif du cerveau humain aurait tendance à fonctionner sur un mode de contrôle inductif à base d'hypothèses de régularité ou de stabilité dont il tente d'évaluer a posteriori la validité afin d'en changer si elles ne sont pas confirmées. Les processeurs temporels primitifs (sur la nature et le support desquels nous restons encore très ignorants) produiraient, par contre, leur calcul à l'abri des interférences et des illusions perceptives.

Autrement dit, nous serions amenés à envisager l'existence dans le système de deux dispositifs de prédiction : l'un primitif reflétant un fonctionnement opératoire inhérent à la construction du réseau nerveux. Il réaliserait des calculs de probabilité rapides et précis, à la manière de l'ordinateur, ce qui rendrait compte en particulier de l'étonnante précision des calculs d'extrapolation de vitesse d'un mobile avec prévision de sa position future (si caractéristique des performances de poursuite en mode prédictif), d'interférence de trajectoires ou de calcul du temps de précontact (Laurent, 1987). Les mêmes capacités expliqueraient également la précision des calculs de probabilité qui sont à la base des extractions de régularité temporelle ou de précision d'occurrence d'un événement.

De toute évidence, et à côté de ces dispositifs de calcul très performants et n'exigeant aucun contrôle direct de la part du sujet, un autre système est également à l'oeuvre. Il réalise des anticipations à plus ou moins long terme, des résolutions de problèmes, des simulations de trajectoires, des évaluations de covariations, des optimisations de stratégies, base de l'élaboration cognitive de nos conduites motrices délibérées.

La supériorité fonctionnelle de ces nouveaux dispositifs cérébraux en versatilité, en souplesse adaptative, en fluidité inventive dans leurs opérations inductives et déductives se paye toutefois d'une plus grande vulnérabilité aux interférences et aux erreurs. Elle s'accompagne aussi d'un allongement très significatif des temps de traitement de l'information. Le fonctionnement parallèle des systèmes automatiques de traitement permet des rapidités de traitement très supérieures à celles du canal attentionnel de l'expérience consciente qui impose une limitation au débit des informations assimilables par ce système supérieur de contrôle.

On peut illustrer ce point de vue par l'expérience suivante. Dans la poursuite oculaire ou oculo-manuelle d'une cible mobile il est possible, comme nous

l'avons vu, de solliciter le système soit dans la modalité réactive (l'oeil ou la main réduit constamment l'écart à la position réelle de la cible par une correction en feedback direct) soit dans la modalité prédictive (le système extrapole la trajectoire future de la cible et le déplacement de l'oeil ou de la main anticipe sa position future calculée). Si la cible stoppe soudainement la réaction du système en modalité réactive est très rapide alors que la suspension du mouvement surviendra beaucoup plus tardivement si le système est en fonctionnement prédictif (Becker et Fuchs, 1985). Je suis porté à penser que ces différences de temps de réponse suivant la modalité de gestion des comportements moteurs ne sont peut-être pas sans conséquence dans certaines performances sportives. De ce point de vue, Flowers (1978) commentant le fait que l'opérateur humain, à la différence peut-être des animaux, manifeste une nette propension à travailler en mode prédictif (même dans des situations où le mode réactif pourrait être possible), signalait que le mode prédictif exposait dans certaines circonstances à des erreurs beaucoup plus importantes et parfois catastrophiques, dans des conditions où l'adoption possible d'un mode réactif aurait constitué une stratégie beaucoup plus fiable. Dans certains cas cependant la stratégie peut être imposée par les conditions expérimentales. Le mode réactif n'est possible qu'en deçà d'une vitesse de déplacement de la cible compatible avec le temps d'intervention du feedback, au-delà une commutation sur le mode prédictif devient nécessaire (Pew, 1974). Ce qui nous amène à un second ordre de réflexion lié aux stratégies redondantes parallèles et aux typologies réactionnelles.

## **5.2. VARIABILITÉ INTER- ET INTRA-INDIVIDUELLE**

La présence de la variabilité inter- et intra-individuelle dans les activités sensori-motrices a longtemps été considérée comme une source de bruit nuisible à la réalisation des expériences. Différents artifices de traitement statistique permettent d'y remédier. Le mouvement que l'on voit actuellement s'amorcer, et dont l'ampleur reste encore modeste, appelle une reprise en considération des différences individuelles comme significatives des modalités réactionnelles dominantes chez un individu donné et par suite intéressantes à étudier par elles-mêmes.

La notion de systèmes distribués dérive de l'existence, aujourd'hui démontrée, de canaux de traitement de l'information parallèles et redondants susceptibles de contribuer, en combinaisons variées, à la réalisation de la même production perceptive ou comportementale. Cette redondance de circuits disponibles pour la même finalité offre une variété de solutions possibles à un problème perceptif ou moteur donné.

Ce point vient encore d'être récemment souligné à la fois par les neurophysiologistes dans leur analyse des différents canaux de traitement des informations visuelles (De Yoe et Van Essen, 1988) et par les comportementalistes dans une étude des stratégies d'évaluation de la verticale (Ohlmann, 1988). La prévalence qu'un sujet sera amené à donner à tel ou tel de ces circuits peut provenir soit du fait d'expériences initiales ayant spontanément favorisé puis consolidé ce choix, soit du fait de renforcements éducatifs.

Ainsi, l'expérimentation nous a montré que la présence ou l'absence d'un champ visuel ambiant structuré modifie complètement le mode opératoire du système nerveux pour la capture fovéale d'une cible visuelle sur un mode exocentrique ou égocentrique. Le mode exocentrique repose essentiellement sur une hypothèse cognitive de stabilité du cadre visuel et de la cible qu'il contient (une inférence prédictive). Lorsque l'axe du regard est intentionnellement déplacé et que l'image du monde extérieur balaye la rétine le regard est transporté en des lieux repérés dans ce référentiel extérieur stabilisé. Le mode égocentrique, par contre, enchaîne une série de réactions réflexes où signal d'erreur rétinien et signal de position de l'oeil dans l'orbite se combinent pour définir la direction et l'amplitude du vecteur dont le regard doit se déplacer pour être amené en coïncidence avec la cible dont la position est repérée dans un référentiel centré sur le corps.

Les deux stratégies sont disponibles pour le sujet et selon les situations l'une peut s'avérer plus efficace que l'autre. Conti et Beaubaton (1980) ont pu montrer, par exemple, que la précision d'un pointage visuo-manuel en boucle ouverte (sans possibilité de corrections visuelles en feedback) était meilleure en présence d'un cadre visuel structuré que lors d'une visée d'une cible lumineuse présentée sur un fond homogène ou dans l'obscurité. Nous avons pu montrer, avec Michèle Brouchon et Pierre Jordan (Paillard et al., 1981), que la recalibration adaptative des coordinations visuo-manuelles après déviation prismatique du champ visuel donnait lieu à la combinaison d'une stratégie ego et exocentrique chez les sujets sélectionnés comme de bons adapteurs. Par contre, on rencontre dans la population normale des sujets "mono-stratégiques" moins bons adapteurs et également des sujets très peu doués. Cet aspect a également été souligné par Ohlmann (1988) dans son étude des capacités individuelles d'évaluation de la verticale. Le constat important qu'il y a lieu de faire ici est que les sujets présentent des propensions individuelles variables à user prioritairement de l'une ou l'autre des stratégies disponibles ou à les combiner synergiquement.

Ces différences individuelles s'inscrivent le plus souvent sur un continuum aux deux extrêmes duquel se définissent des types réactionnels tranchés.

Il suffit de rappeler ici la fameuse "dépendance du champ" qui caractérise la plus ou moins grande aptitude des sujets à abstraire leurs jugements perceptifs des effets du contexte (Witkin, 1978). Rappelons qu'elle se mesure à l'influence qu'exerce la présence d'un cadre visuel incliné sur la capacité qu'ont les sujets à orienter verticalement une barre mobile autour du centre géométrique du cadre. Les stratégies utilisées par les sujets bien typés comme dépendants ou indépendants du champ seront clairement différenciées alors que les sujets moins bien typés vont, suivant la tâche, adopter l'une ou l'autre des stratégies ou fluctuer de l'une à l'autre au cours d'une même tâche ou encore combiner les deux stratégies dans une utilisation parallèle et synergique. De la même façon, la dichotomie du prédictif et du réactif et les supports nerveux différenciés qu'on peut actuellement lui associer posent clairement le problème des options stratégiques offertes au sujet en fonction des performances motrices qu'il a à accomplir. Il importerait sans doute de rechercher au plan comportemental les situations qui pourraient être aisément révélatrices des options stratégiques dominantes des sujets et, comme ce fut le cas pour les critères de dépendance-indépendance du champ, tenter d'établir la validité et la stabilité d'une catégorisation typologique du sujet afin d'en éprouver la portée heuristique dans le champ des APS. Dans une telle perspective toutefois, et à supposer vérifiée l'hypothèse typologique, on débouchera inévitablement sur le problème de l'analyse des tâches motrices et de l'identification de ce qui, dans leur exécution, sollicite préférentiellement ou impérativement les modalités prédictives ou réactives des contrôles sensori-moteurs. Dès lors que penser d'une telle approche taxonomique des activités sportives ?

### **5.3. INTÉRÊT D'UNE TAXONOMIE DES APS**

Si la pratique éducative a pour but d'optimiser la performance en adaptant la gestion des instruments moteurs aux exigences du contexte environnemental qui caractérise la situation, il est tout à fait clair qu'un tel objectif exige une bonne connaissance de la personnalité du sujet dans ses modes réactionnels et ses options stratégiques dominantes, mais il demande aussi une bonne analyse de la tâche quant à la nature des problèmes sensori-moteurs qu'elle pose. Dans la perspective où nous avons placé cette présentation il nous paraîtrait intéressant dans une voie déjà ouverte par Poulton (1957) et plus récemment par Gentile et al. (1975) d'envisager une taxonomie des APS qui prendrait en considération la plus ou moins grande

dépendance dans laquelle se trouverait leur production de la mise en jeu des mécanismes d'anticipation et de prédiction. Il nous faut cependant insister sur les difficultés que rencontre ce type d'approche à la recherche d'indicateurs fiables et mesurables permettant de définir le profil d'exigence d'une tâche, à l'instar des analyses de poste de travail entrepris par les ergonomistes dans une perspective d'adaptation de l'Homme à ses conditions de travail. L'espoir de pouvoir caractériser globalement une tâche sportive par un coût énergétique ou un hypothétique "coût informationnel" est probablement mince en dépit des résultats prometteurs obtenus par Dransart (cité par Parlebas, 1984) en matière de coût énergétique mesuré par la  $\dot{V}O_2$  max. Cette mesure permettrait, semble-t-il, une classification relativement consistante de certaines épreuves où la dépense énergétique détermine la performance de façon dominante. En dehors du fait que ce type de mesure n'est pas exempt de variabilité (due notamment au style de pratique adopté c'est-à-dire à la stratégie dominante du sujet) il semble en tous cas mieux fondé qu'une référence à un hypothétique coût informationnel tel que suggéré par Parlebas (1985). Ce dernier propose, en effet, d'évaluer ce coût à partir d'une échelle subjective qui hiérarchise les tâches en termes de basse ou de haute "sémiotricité" en fonction de l'importance présumée de la demande de la tâche en décodage sémantique. Comme on le sait, en matière de traitement de l'information c'est moins la quantité ou la qualité des informations à traiter qui sont importantes que le temps dont on dispose pour en opérer le traitement. Autrement dit, ce serait théoriquement plus le débit des informations sémantiques à traiter qui serait à prendre en considération dans une tâche donnée que leur quantité ou leur complexité. Lorsque j'avais moi-même proposé (Paillard, 1976) la prise en considération dans les APS, à côté du "coût énergétique" de la performance, d'une évaluation de leur "coût informationnel" c'est en me référant principalement au modèle de canal de traitement à capacité limitée tel que formulé par Welford (1959) et Broadbent (1958) dans le cadre d'une théorie du "canal unique". Dans cette conception ce n'est pas la quantité absolue d'informations à traiter qui est susceptible de constituer une charge pour le système nerveux, car sa capacité de traitement sur ce plan est incommensurable, mais c'est le débit acceptable par le canal unique avec sa limite de capacité, limite qui impose une contrainte plus ou moins forte au système de traitement. L'encombrement du canal par une autre tâche annexe représente une charge (un coût informationnel ?) pour le système qui doit alors réduire le débit des informations à traiter pour ne pas risquer une détérioration de la performance. En fait, on rejoint ici toute la problématique de la gestion des processus attentionnels et de l'allocation des ressources de

traitement (voir revue de Nougier, 1989). La notion de "coût informationnel" s'identifie donc à celle de "demande attentionnelle" d'une tâche donnée, la considération des temps de traitement pouvant également être prise en considération comme nous l'avons vu plus haut. Il est toutefois évident que les modalités prédictives de contrôle de l'action sont généralement attentionnellement plus coûteuses que les modalités purement réactives mobilisant des prédispositions déjà câblées. Il est cependant des guidages en feedback qui mobilisent les contrôles attentionnels (l'ajustement terminal d'un pointage visuo-manuel en est un bon exemple) comme il est des activités prédictives inconscientes entièrement automatisées (cf. les opérateurs primitifs de prédiction évoqués ci-dessus). La dualité automatique-contrôlée (Shiffrin et Schneider, 1977) ne recoupe donc pas celle du prédictif-réactif, ce qui, évidemment, ne facilite guère la recherche de catégorisations taxonomiques pertinentes.

L'opposition entre contextes situationnels porteurs d'imprévu dits "sauvages" et contextes "domestiqués" entièrement prévisibles proposés par Parlebas (1985) pourrait ici être utile. Toutefois, la prise en considération des multiples entrées possibles (énergétique-informationnel, gestème-proxème, psychomotricité-sociomotricité, communication et contre-communication motrices, domestication-sauvagerie du contexte, sécurité-risque, etc.) proposées par cet auteur conduit à une classification des APS basées sur des catégorisations phénoménales dont l'intérêt descriptif n'est pas contestable, mais dont la pluridimensionnalité pose des problèmes redoutables au plan heuristique. La tentative de Parlebas de dégager des "universaux" descripteurs de la configuration des traits caractéristiques d'une tâche sportive au sein d'un réseau d'interaction multidimensionnelle peut apparaître séduisante. Sa valeur heuristique me paraît cependant dépendre de la possibilité pratique d'une description correspondante de la configuration d'aptitudes du sujet susceptible de conduire à des évaluations pronostiques. J'inclinerais ici à m'interroger sur la pertinence d'une tentative similaire qui serait basée non plus sur des catégories phénoménales d'interaction mais sur un inventaire des opérations nerveuses nécessairement requises pour la réalisation de ces multiples interactions. Elle pourrait sans doute avoir le mérite d'une réduction des variables à prendre en considération dans une perspective taxonomique. L'aventure, j'en conviens, n'est pas sans risque mais pourrait tenter quelques audacieux.

Ainsi les problèmes finalement posés par la dichotomie fonctionnelle prédictif-réactif dans l'optique des préoccupations des praticiens apparaissent multiples. Les options stratégiques adoptées par les sujets

Sont-elles susceptibles de modulation pédagogique, sont-elles modifiables, renforçables, améliorables par l'exercice ? Est-il plus profitable d'inciter le sujet à opter délibérément pour l'une ou l'autre stratégie en fonction des exigences de la tâche à réaliser ? Est-il au contraire recommandable d'induire chez les sujets une attitude de disponibilité totale ne privilégiant aucun biais stratégique et laissant aux régulations automatiques la liberté d'un choix autonome adapté aux circonstances ? Les récents travaux de Nougier (1989) sur les stratégies attentionnelles des sportifs démontrent que l'attitude optimale est souvent celle où l'attention du sujet reste globale et diffuse, attitude jugée plus efficace pour l'efficacité de la performance qu'un recours trop systématique à des hypothèses prédictives souvent génératrices de retards réactionnels lorsqu'elle se trouve prise en défaut. Sans doute la solution de ces problèmes sort-elle de la compétence stricte du fondamentaliste mais peut-être y a-t-il là matière à utile réflexion pour les hommes de terrain.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- ALEXANDER, G.E., DELONG, M.R., & STRICK, P.L. (1986). Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex. *Annual Review Neuroscience*, 9, 357-381.
- BEAUBATON, D., TROUCHE, E., AMATO, G., & LEGALLET, E. (1981). Perturbation des déclenchements et de l'exécution d'un mouvement visuellement guidé chez le Babouin, au cours du refroidissement ou après lésion du segment interne du Globus Pallidus. *Journal de Physiologie* (Paris), 77, 107-118.
- BECKER, W., & FUCHS, A.F. (1985). Prediction in the oculomotor System : smooth pursuit during transient disappearance of a visual target. *Experimental Brain Research*, 57, 562-575.
- BIZZI, E. (1974). The coordination of eye-hand movements. *Scientific American*, 231, 100-106.
- BIZZI, E., POLIT, A., & MORASSO, P. (1976). Mechanisms underlying achievement of final head position. *Journal of Neurophysiology*, 39, 435-444.
- BONNET, M. (1983). Anticipatory changes of long-latency stretch responses during preparation for directional hand movements. *Brain Research*, 280, 51-62.
- BROADBENT, D. (1958). *Perception and communication*. London: Pergamon.
- CHATILLON, J.F. (1985). Problèmes théoriques posés par l'analyse des conduites sensori-motrices complexes. Les niveaux de régulation, la prise de conscience. In P. Arnaud & G. Broyer (Eds.), *La pédagogie des activités physiques et sportives*, (pp. 313-334). Toulouse: Privat.

- CONTI, P., & BEAUBATON, D. (1980). Role of structural visual field and visual reafference in accuracy of pointing movements. *Perception and Motor Skills*, 50, 239-244.
- CRAIK, K.J.W. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge: University Press.
- DAMASIO, A.R., & VAN HOESEN, G.W. (1980). Structure and function of the supplementary motor areas. *Neurology*, 30, 359.
- DAMASIO, A.R., VAN HOESEN, G.W., & VILENSKY, J. (1981). Limbic-motor pathways in the primate. A means for emotion to influence motor behavior. *Neurology*, 31, 60.
- DE YOE, E.A., & VAN ESSEN, D.C. (1988). Concurrent processing stream in monkey visual cortex. *TINS*, 11, 219-226.
- DROULEZ, J., BERTHOZ, A., & VIDAL, P.P. (1985). Use and limits of visual vestibular interaction in the control of posture. Are there two modes of sensori-motor control. In M. Igarashi & F.O. Black (Eds.), *Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium*. 7th International Symposium Society of Posturography, Houston, Texas (pp. 14-21). Basel: Karger.
- DURUP, H. (1967). Recherche de plans d'expériences temporels à transitions exhaustives simples ou multiples. *Bulletin du CERP*, Paris, 16, 21-39.
- ECKMILLER, R. (1987). Neural control of pursuit eye movement. *Physiological Reviews*, 67, 797-857.
- EVARTS, E.V., KIMURA, M., WURTZ, R.H., & HIKOSAKA, O. (1984). Behavioral correlates of activity in basal ganglia neurons. *TINS*, 447-453.
- EVARTS, E.V., & TANJI, J. (1974). Gating of motor reflexes by prior instruction. *Brain Research*, 71, 479-494.
- FERRANDEZ, A.M., & PAILHOUS, J. (1986). From stepping to adaptive walking: modulations of an automatism. In H.T.A. Whiting & M.G. Wade (Eds.), *Themes in motor development*. (pp. 265-278). Dordrecht: Martinus Nijhoff Pub.
- FLOWERS, K.A. (1976). Visual "closed loop" and "open loop" characteristics of voluntary movement in patient with parkinsonism and intention tremor. *Brain*, 99, 269-310.
- FLOWERS, K.A. (1978). The predictive control of behaviour: appropriate and inappropriate actions beyond the input in a tracking task. *Ergonomics*, 21, 109-122.
- FUSTER, J.M. (1985). The prefrontal cortex, mediator of cross-temporal contingencies. *Human Neurobiology*, 4, 169-179.
- GEMBA, H., & SASAKI, K. (1984). Distribution of potentials preceding visually initiated and self-paced hand movements in various cortical areas of the monkey. *Brain Research*, 306, 207-214.
- GENTILE, A.M., HIGGINS, J.R., MILLER, E.A., & ROSEN, B.M. (1975). Actes du 7e Symposium en apprentissage psycho-moteur et psychologie du sport. *Mouvement*. n° spécial.

- GLICKSTEIN, M., & MAY, J.G. (1982). Visual control of movement: the circuits which link visual to motor areas of the brain with special reference to the visual input to the pons and cerebellum. In W.D. Neff (Ed.), *Contribution to sensory Physiology*, (pp. 103-145). London: Academic Press.
- GOLDBERG, G. (1984). Response and projection: a reinterpretation of the premotor concept. In E.A. Roy (Ed.), *Neuropsychology of apraxia and related disorders, Part 2* (pp. 251-266). Amsterdam: Elsevier North Holland.
- GOLDBERG, G. (1985). Supplementary motor area structure and function. Review and hypothesis. *Behavioral and Brain Sciences*, 8, 567-612.
- GOLDBERG, M.E., & WURTZ, R.H. (1972). Activity of superior colliculus in behaving monkey. II. The effect of attention on neuronal responses. *Journal of Neurophysiology*, 35, 560-574.
- GOLDMAN-RAKIC, P.S. (1988). Topography of cognition : parallel distributed networks in primate. Association Cortex. *Annual Review Neuroscience*, 11, 137-156.
- GREGORY, R.L. (1972). A look at biological and machine perception. In *Machine intelligence 7*, chap. 21, (pp. 377-385). Edinburgh: University Press.
- GUITTON, D., BUCHTEL, H.A., & DOUGLAS, R.M. (1985). Frontal lobe lesions in man cause difficulties in suppressing reflexive glances and in generating goal-directed saccades. *Experimental Brain Research*, 58, 455-472.
- GUITTON, D., KEARNEY, R.E., WERELEY, N., & PETERSON, B.W. (1986). Visual, vestibular and voluntary contributions to human head stabilization. *Experimental Brain Research*, 64, 59-69.
- HALLETT, P.E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Research*, 18, 1279-1296.
- HORE, J., MEYER LOHMANN, J., & BROOKS, V.B. (1977). Basal ganglia cooling disables learned arm movements of monkeys in the absence of visual guidance. *Science*, 195, 584-586.
- KONORSKI, J. (1967). *Integrative activity of the brain. An interdisciplinary approach*. Chicago: University Chicago Press.
- LAPLANE, D., BAULAC, M., WIDLOCHER, D., & DUBOIS, B. (1984). Pure psychic akinesia with bilateral lesion of basal ganglia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 47, 377-385.
- LAURENT, M. (1987). *Les coordinations visuo-motrices. Etude comportementale chez l'Homme*. Thèse de Doctorat d'Etat: Université d'Aix-Marseille II, Faculté des Sciences de Luminy.
- MASSION, J. (1984). Postural changes accompanying voluntary movements. Normal and pathological aspects. *Human Neurobiology*, 2, 261-267.
- MASSION, L, VIALLET, F., MASSARINO, R., & KHALIL, R. (1989). La région de l'aire motrice supplémentaire est impliquée dans la coordination entre posture et mouvement chez l'Homme. *Comptes Rendus Académie des Sciences*, Paris, 308, série III, 417-423.

- MELVILL JONES, G., BERTHOZ A., & SEGAL, B. (1984). Adaptive modification of the vestibulo-ocular reflex by mental effort in darkness. *Experimental Brain Research*, 56, 149-153.
- MISHKIN, M. & PETRI, H.L. (1984). Memories and habits. In L.R. Squire & N. Butters (Eds.), *Neuropsychology of memory*, chap. 28, (pp. 287-296). London: The Guilford Press.
- MOLL, L., & KUYPERS, H.G.J.M. (1977). Premotor cortical ablations in monkeys : contralateral changes in visually guided behavior. *Science*, 198, 317-319.
- NOUGIER, V. (1989). *L'orientation de l'attention visuelle en sport*. Thèse de Doctorat: Université Paris X.
- NYSENBAUM-REQUIN, S., & PAILLARD, J. (1966). Problèmes posés par une étude des effets de la stimulation réticulaire sur le temps de réaction chez le chat. *Cahiers de Psychologie*, IX, 123-133.
- OAKLEY, DA. (1985). Cognition and imagery in animals. In D.A. Oakley (Ed.), *Brain and mind*, chap. 4 (pp. 99-131). London: Methuen.
- OHLMANN, T. (1988). *La perception de la verticale. Variabilité interindividuelle dans la dépendance à l'égard des référentiels spatiaux*. Thèse de Doctorat d'Etat: Université Paris VIII.
- OKANO, K., & TANJI, J. (1987). Neuronal activities in the primate motor fields of the agranular frontal cortex preceding visually triggered and self-paced movement. *Experimental Brain Research*, 66, 155-166.
- PAILLARD, J. (1948). Quelques données psychophysiologiques relatives au déclenchement de la commande motrice. *Année Psychologique*, 46-47, 28-47.
- PAILLARD, J. (1976a). Réflexions sur l'usage du concept de plasticité en Neurobiologie. *Journal de Psychologie* (Paris), 1, 33-47.
- PAILLARD, J. (1976b). L'acte moteur comme facteur d'adaptation et de progrès évolutif. *Colloque International FSGT*, Ed. Français Réunis, 71-108.
- PAILLARD, J. (1982). Apraxia and the Neurophysiology of motor control. *Phil. trans. Royal Soc. London*, B298, 111-134.
- PAILLARD, J. (1985). Les niveaux sensori-moteurs et cognitifs du contrôle de l'action. In M. Laurent & P. Therme (Eds.), *Recherches en activités physiques et sportives 1*, (pp. 147-163). Marseille: Editions UEREPS, Université Aix-Marseille II.
- PAILLARD, J. (1987a). Cognitive versus sensorimotor encoding of spatial information. In P. Ellen & C. Thinus-Blanc (Eds.), *Cognitive processes and spatial orientation in animal and man. Vol. II. Neurophysiology and developmental aspects*, (pp. 43-77). Dordrecht: Martinus Nijhoff Pub.
- PAILLARD, J. (1987b). Vers une psychobiologie de l'intentionnalité ? In M. Laurent & P. Therme (Eds.), *Recherches en APS 2*, (pp. 163-194). Marseille: Editions UEREPS, Université Aix-Marseille II.
- PAILLARD, J. (sous presse). Basic neurophysiological structures of eye-hand coordination. In C. Bard, M. Fleury & L. Hay (Eds.), *Development of eye- and coordination across the lifespan*.

- PAILLARD, J. & AMBLARD, B. (1985). Static versus kinetic visual cues for the processing of the spatial relationship. In D.J. Ingle, M. Jeannerod & D.N. Lee (Eds.), *Brain mechanism of spatial vision*, (pp. 299-330). La Haye: Martinus Nijhoff.
- PAILLARD, J., BARD, C., & FLEURY, M. (1989). Synchronizing hand and foot movement in a projective or reactive mode : two contrasting schedules of motor command. *Society for Neuroscience*, Abstract, n° 243.3.
- PAILLARD, J., JORDAN, P.L., & BROUCHON M. (1981). Visual motion cues in prismatic adaptation : evidence for two separate and additive processes. *Acta Psychologica*, 48, 253-270.
- PARLEBAS, P. (1985). La motricité ludosportive. Psychomotricité et socio-motricité. In P. Arnaud, G. Broyer (Eds.), *La psychopédagogie des activités physiques et sportives*, chap. 21 (pp. 335-362). Toulouse: Privat.
- PEW, P.W. (1974). Human perceptual performance. In B.H. Kantowitz (Ed.), *Human information processing. Tutorials in performance and recognition*, New-York: Erlbaum,
- POSNER, M.I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale. N.J.: Erlbaum.
- POULTON, E.C. (1957). On prediction of skill movements. *Psychological Bulletin*, 54, 467-478.
- REQUIN, J. (1980). *Anticipation et comportement*. Paris: Editions du CNRS.
- REQUIN, J. (1985). Looking forward to moving soon : ante factum selective processes in motor control. In M. Posner & O. Marin (Eds.), *Attention and Performance XI*, (pp. 147-167). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Ass.
- RIPOLL, H. (1989). *Le traitement des informations visuelles en sport*. Thèse de Doctorat d'Etat: Université Aix-Marseille II, Faculté des Sciences de Luminy.
- ROMO, R., & SCHULTZ, W. (1987). Neuronal activity preceding self-initiated or externally timed arm movements in area 6 of monkey cortex. *Experimental Brain Research*, 67, 656-662.
- ROTHWELL, J.C., TRAUB, M.M., & MARSDEN, C.D. (1980). Influence of voluntary intent on the human long-latency stretch reflex. *Nature*, London, 286, 486-498.
- SANIDES, F. (1964). The cyto-myeloarchitecture of the human frontal lobe and its relations to phylogenetic differentiation of the cerebral cortex. *Zeitschrift für Hirnforschung*, 6, 269-282.
- SCHLAG, J., & SCHLAG-REY, M. (1985). Unit activity related to spontaneous saccades in frontal dorsomedial cortex of monkey. *Experimental Brain Research*, 58, 208-211.
- SHIFFRIN, R.M., & SCHNEIDER, W. (1977). Controlled and automatic human information processing. II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- SHILLER, P.H., & SANDELL, J.H. (1983). Interactions between visually and electrically elicited saccades before and after superior colliculus and frontal eye field ablations in rhesus monkey. *Experimental Brain Research*, 49, 381-392

- STARK, L., IIDA, M., & WILLIS, P.A. (1961). Dynamic characteristics of the motor coordination System in man. *Biophysical Journal*, 1, 279-300.
- THOMAS, G.J. (1984). Memory : time binding in organisms. In L.R. Squire & N. Butters (Eds.), *Neuropsychology of memory*, (pp. 374-384). London: The Guilford Press.
- WELFORD, A.T. (1959). Evidence of a single channel decision mechanism limiting performance in a serial reaction task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11, 193-210.
- WIESENDANGER, M., RÜEGG, D.G., & WIESENDANGER, R. (1979). The corticopontine system in primates : anatomical and functional considerations. In J. Massion & K. Sasaki (Eds.), *Cerebro-cerebellar interactions*, (pp. 45-66). Amsterdam: Elsevier-Northholland.
- WISE, S.P. (1985). The primate premotor cortex : past, present and preparatory. *Annual Review of Neurosciences*, 8, 1-19.
- WITKIN, H.A. (1978). Cognitive styles in personal and cultural adaptation. *Heinz Werner Lecture Series*, 1977, vol. 11, Clark University Press.
- WOODROW, H. (1914). The measurement of attention. *Psychological Monographs*, 17 (whole n° 76).