

## LES NIVEAUX SENSORI-MOTEUR ET COGNITIF DU CONTROLE DE L'ACTION

**Jacques PAILLARD**

C.N.R.S., INP4, 31 chemin Joseph Aiguier,  
13402 Marseille Cedex 9.

### **ABSTRACT :**

*A functional distinction between two levels of information processing by the nervous system is proposed. This implies two modes of dialogue between the organism and its environment : one that directly relates, via external loops, sensory information gathered by sense organs from the physical world, to motor activities which collect and transform this information ; the other dialogue is fed by internal loops that relate the cognitive apparatus to a mental representation of the environment stored in its memories. The compatibility of such a distinction with recent neurophysiological evidences and its relevance for our understanding of action-control are discussed.*

**MOTS CLES :** contrôles sensori-moteurs, contrôles cognitifs, schéma d'action, plan, programme.

**KEY WORDS :** sensori-motor control, cognitive control, scheme of action, plan, programme.

Le mouvement est la manifestation la plus directe de ce qui vit, et reste l'indicateur privilégié du fonctionnement des systèmes vivants sur lequel s'est fondé le discours scientifique de la Biologie. Un discours qui a d'ailleurs historiquement oscillé entre deux conceptions : d'un côté celle où le mouvement est la traduction visible d'un processus interne transformant l'énergie venue du dehors ; le mouvement y apparaît comme traduisant les réponses de l'organisme aux sollicitations de l'environnement et comme l'instrument de sa soumission et de son adaptation à l'ordre naturel. De l'autre, celle où l'activité motrice est, au contraire, la manifestation d'une énergie interne, la production autonome d'une organisation vitale qui se développe pour accroître sa maîtrise de l'ordre de la nature en le transformant à sa mesure. Du premier courant est issu le modèle réflexologique classique érigé en principe général explicatif du comportement ; il a eu, comme on le sait, une influence dominante sur l'édification de nos connaissances actuelles sur le système nerveux (Fearing, 1930). Le second courant a nourri les thèses du vitalisme et, en mettant l'accent sur le potentiel d'initiative, de spontanéité et de création du système vivant, il a privilégié le modèle d'un organisme autonome assimilant activement l'environnement à sa structure propre, originale et singulière.

L'opposition de ces deux courants a suscité bien des controverses. Elle a jalonné l'histoire des Sciences Biologiques (Jacob, 1970) et plus particulièrement l'évolution de nos conceptions de l'organisation cérébrale (Jeannerod, 1983) et du dialogue sensori-moteur qu'entretient l'organisme avec son milieu de vie. Elle a aussi, bien entendu, alimenté les vieux débats, toujours ouverts, concernant les rapports qu'entretiennent l'âme et le corps, l'esprit et la matière.

L'indiscutable succès des interprétations mécanistes et le dogmatisme de leur emprise sur les approches traditionnelles ont progressivement contribué à rejeter hors du champ des objets scientifiquement saisissables l'aspect psychique volontaire, "subjectif", du contrôle de nos actes pour n'en retenir que l'aspect proprement automatique et "machinal".

La vigoureuse poussée de la Biologie moderne et le développement actuel des Neurosciences laissent entrevoir de nouvelles perspectives. Ayant désormais exorcisé les démons du vitalisme et de la finalité qui entravaient sa progression, la Biologie se sent désormais davantage prête à lever les interdits qui pesaient sur les notions de conscience, de volonté, d'objets mentaux, d'individualité autonome : elle est désormais mieux armée, méthodologiquement et technologiquement, pour commencer à investir certains terrains jusqu'ici traditionnellement réservés aux investigations du psychologue ou du neuropsychiatre.

Les discussions qui confrontent actuellement, précisément sur le terrain des activités physiques et sportives, les spécialistes des Neurosciences et les Psychologues qui se qualifient de "cognitivistes" me paraissent assez illustratives de ce point de vue.

Les premiers ont beaucoup progressé dans la connaissance des mécanismes nerveux qui sous-tendent la production "machinale" des activités motrices. Ils en découvrent la subtilité d'organisation, la flexibilité des auto-réglages et les surprenantes capacités auto-adaptatives dont ils paraissent dotés sans avoir à recourir à une quelconque surveillance attentionnelle ou à mobiliser la vigilance consciente du sujet producteur de cette activité. Ils s'engagent donc activement dans l'exploration des potentialités et des limites de ce pilotage automatique de l'action sans, bien entendu, sous-estimer l'importance du contrôle des niveaux supérieurs (Paillard, 1982a).

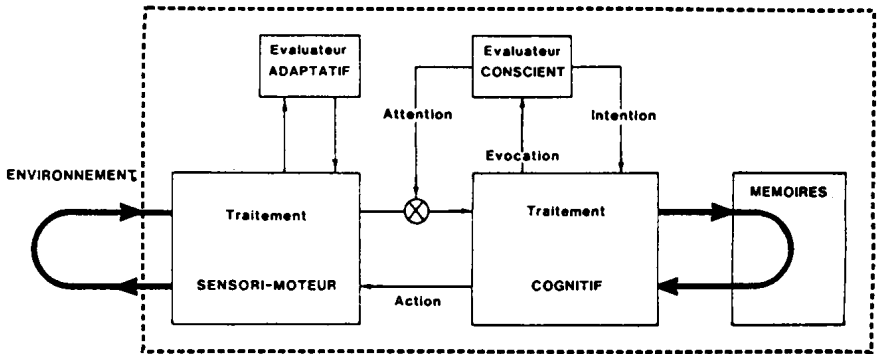
Les seconds, sans ignorer le rôle des régulations automatiques dans l'exécution des mouvements, ne manquent certainement pas d'arguments pour démontrer la puissance d'intervention des contrôles "psychiques" de l'action et le rôle déterminant des opérations mentales supérieures dans l'apprentissage, la conception, la planification, voire l'exécution des productions motrices (Pailhous, 1985).

Sans nous attarder ici sur les ambiguïtés sémantiques de la notion de "cognition" et de "fonctionnement cognitif" qui peuvent parfois (artificiellement, à mon sens) contribuer à obscurcir certains débats (voir Paillard, sous presse/c), nous retiendrons simplement que chacun des protagonistes, avec ses concepts et ses méthodologies propres, aborde le problème des contrôles de l'action précisément aux deux pôles d'affrontement historique et de divergence du discours biologique que nous rappelions au début de cet exposé. On peut s'en réjouir car les progrès de l'une et l'autre de ces disciplines et les possibilités de dialogue réel qu'ils ouvrent permettent d'entrevoir l'espoir d'une intersection de leur champ de recherches et d'une convergence de ces deux approches complémentaires.

Afin de mieux cadrer les problèmes, je voudrais proposer dans le schéma suivant (voir figure 1) une hypothèse de compartimentalisation fonctionnelle des systèmes de contrôle de productions motrices à deux niveaux : l'un "sensori-moteur", l'autre "cognitif". Cette hypothèse, qu'il importe de considérer dès l'abord comme volontairement simplificatrice, a surtout pour but de susciter le débat et la réflexion.

La distinction, ici faite, entre deux niveaux de traitement des informations par le système nerveux, part du constat de l'existence de deux formes de dialogue entre l'organisme et son environnement : l'un direct par les boucles externes qui relient les informations sensorielles aux activités motrices qui les suscitent et les transforment ; l'autre indirect par les boucles internes qui alimentent le dialogue de l'appareil "cognitif" avec la représentation de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires. Nous utilisons ici le terme de "cognitif" dans le sens que donne Piaget aux processus intériorisés qui opèrent sur les représentations mentales et abstraites des réalités physiques en se libérant des contraintes qui affectent le dialogue sensori-moteur direct avec l'environnement.

Figure 1.



**Le traitement sensori-moteur** est alimenté par les boucles moto-sensorielles qui se ferment sur l'environnement. Les informations sensorielles sont sélectionnées par les questions motrices que pose le système à l'environnement. Les processus adaptatifs réalisent un remaniement de la logique câblée et constituent les mémoires de ce niveau.

**Le traitement cognitif** est alimenté par les boucles internes qui se ferment sur les mémoires du système. Il reçoit du compartiment sensori-moteur des informations sélectionnées par les processus attentionnels. Il comprend deux sorties fonctionnelles : celle des programmes d'actions dirigée sur le compartiment sensori-moteur ; celle des programmes d'évocation dirigée sur l'évaluateur "conscient". Ce dernier est l'instrument de la prise de conscience, des contrôles attentionnels et intentionnels du fonctionnement de l'appareil cognitif (d'après J. Paillard, sous presse/c).

Il nous importe, tout d'abord, d'examiner la compatibilité d'un tel schéma avec les acquis récents des Neurosciences, en précisant les modalités d'intervention spécifique dans les contrôles moteurs de chacun des compartiments considérés. Nous envisagerons ensuite leurs modes d'interaction et identifierons enfin la pertinence des interrogations qu'ils soulèvent pour les praticiens de l'Education Physique.

## 1. Les traitements sensori-moteurs

Nous réservons ici ce terme aux opérations du système nerveux qui s'ordonnent dans des architectures rigidement câblées telles qu'elles nous sont révélées par les études physiologiques classiques. Elles demeurent en fait le terrain privilégié de la plupart des approches modernes.

Les récents progrès de la neuroanatomie et de la neurochimie et les ressources de la microélectrophysiologie ont, en effet, largement étendu le champ de décryptage de la microcircuiterie des connexions interneuronales aux divers niveaux d'une organisation nerveuse hiérarchisée. Ils imposent désormais l'idée d'une architecture modulaire des opérations nerveuses.

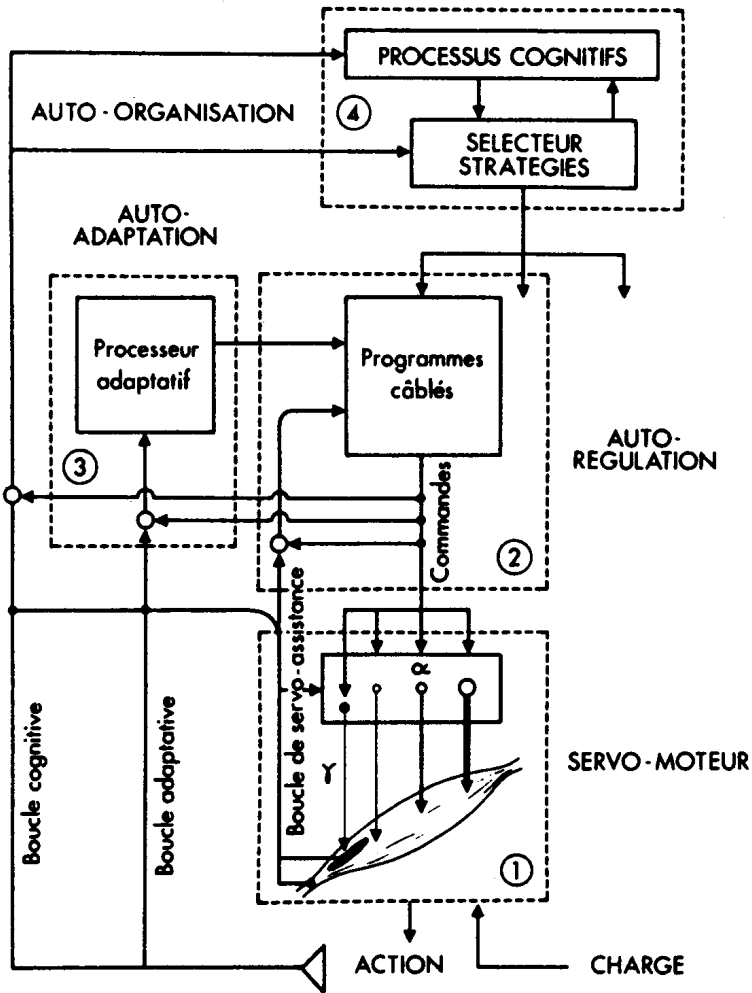
A la base de cette hiérarchie, on trouve le module du *générateur de force musculaire* que constitue le muscle et le noyau moteur qui le commande. Grâce aux circuits rétroactifs des propriocepteurs ce moteur est doté d'une véritable assistance automatique. On parle désormais de *servo-moteur* pour désigner cette unité fonctionnelle.

Le couplage de deux servo-moteurs aux actions antagonistes sur un même bras de levier est réalisé par une logique câblée (innervation réciproque) constituant le module du *générateur de déplacement mono-articulaire* à un degré de liberté. Comme le précédent, le fonctionnement de ce générateur est assisté de circuits rétroactifs d'origine proprioceptive. On conçoit dès lors que la commande du mouvement d'un segment pluriarticulaire va résulter du couplage hiérarchisé de ces unités de base dans des ensembles plus complexes. La configuration spatio-temporelle des activités de commande qui engendrent ces mouvements va, là encore, dépendre de logiques câblées d'ordre supérieur.

La notion de "*programme moteur*" s'est imposée dans les études modernes pour désigner les ensembles de modules interconnectés dont la stimulation, à partir de structures "nodales" de déclenchement, libère toute une activité préorganisée qui s'exprime dans un acte moteur biologiquement significatif. Ces programmes constituent également, à leur niveau, des modules servo-assistés. Ils bénéficient, en effet, de régulations automatiques conférant à l'exécution du programme une certaine flexibilité d'expression en fonction des circonstances et des aléas des conditions environnementales. On parle alors d'*auto-régulation cybernétique*. L'ensemble des programmes génétiquement câblés constitue le répertoire de base dont dispose l'organisme pour organiser ses comportements moteurs (voir figure 2). Grâce à ce répertoire préorganisé, les organismes peuvent accomplir les fonctions basales de nutrition, de reproduction et de sauvegarde et, d'une manière générale, établir les dialogues sensori-moteurs nécessaires à leur survie dans l'environnement qui leur est habituel.

La plage d'intervention de ces régulations basales reste cependant étroite et les capacités adaptatives vont s'élargir par la différenciation d'un nouveau palier de contrôle : celui des *processus auto-adaptatifs*. La mobilisation des programmes moteurs et leur relative flexibilité d'exécution repose de fait sur le câblage rigide des modules de base. Il représente donc un mode de régulation préadapté sans mémoire. L'auto-adaptation du programme suppose au contraire une modification acquise et durable de son mode de fonctionnement par remaniement interne de sa circuiterie.

Figure 2. Les niveaux de contrôle hiérarchisés.



1. Le servo-moteur. 2. L'autorégulation cybernétique des programmes câblés. 3. Le processus adaptatif remaniant la logique câblée. 4. L'auto-organisation des processus cognitifs sélecteurs de stratégies (d'après Paillard, 1982a).

Ce remaniement repose sur la modification du pouvoir de transmissions de certaines synapses (changement de gain). L'étude neurophysiologique des processus adaptatifs du niveau sensori-moteur connaît actuellement des succès importants. Elle révèle des potentialités adaptatives de la machine motrice relevant, là encore, de processus entièrement automatiques, au sens où ils semblent intervenir à l'insu du sujet et sans mobiliser sa "prise de conscience". Ceux-ci constituent, de ce fait, une classe de processus d'acquisition

différente de celle qui englobe les phénomènes d'apprentissage classiquement étudiés par la Psychologie.

Ainsi l'un des principes de base de cette *logique d'organisation modulaire hiérarchisée* paraît résider dans la flexibilité que confère à chacune de ces unités fonctionnelles l'existence de circuits d'assistance. Grâce à cette autonomie de réglage, chaque unité dispose d'une possibilité d'auto-ajustement de son activité, d'une tolérance d'écart par rapport à ses normes habituelles de fonctionnement. La hiérarchie des niveaux de contrôle reflète, ici, une cascade de dispositifs de rattrapage des ajustements des niveaux inférieurs. Dès qu'un système est débordé dans ses capacités propres d'auto-régulation, il appelle l'assistance d'un dispositif de régulation supérieur chargé de le ramener dans sa plage d'auto-régulation. On peut ainsi comprendre comment une machine rigidement câblée peut se comporter de façon souple et nuancée et adapter automatiquement son fonctionnement aux contraintes changeantes de son environnement, à condition, toutefois, que ces changements demeurent dans la marge de tolérance de ses capacités régulatrices. Le recours aux processus adaptatifs traduit, de ce point de vue, une capacité supplémentaire d'ajustement autonome conférant au système la possibilité de modifier durablement son fonctionnement interne lorsque l'auto-régulation cybernétique de la machine câblée n'est plus à même de répondre aux problèmes posés.

L'étude des régulations posturales illustre clairement l'existence de cette cascade de dispositifs hiérarchisés réalisant le soutien antigravitaire du corps en station érigée, à un premier niveau par le jeu des réflexes myotatiques élémentaires, à un second niveau par le jeu des réactions compensatrices qui interviennent dans la marge des faibles oscillations de l'équilibre statique du corps, à un troisième niveau par l'appel à des réactions de rattrapage plus élaborées lorsque l'écart ou la brusquerie des changements de contraintes externes décode les capacités compensatrices du niveau précédent, à un quatrième niveau enfin par le recours aux réactions de repositionnement, de redressement du corps dans sa position érigée de référence lorsque la rupture d'équilibre a débordé les capacités de rattrapage. Toutes ces activités se consomment dans le compartiment sensori-moteur du système. On les retrouve présentes chez l'animal décérébré, inscrites par conséquent dans l'écriture des circuits câblés des niveaux mésencéphaliques et spinaux.

L'importance et les surprenantes capacités d'intervention autonome de cette logique précâblée des niveaux inférieurs de l'organisation nerveuse ont été très tôt reconnues. On rappellera, ici, la célèbre controverse qui opposa Pfluger (voir Fearing, 1930) aux tenants du mécanisme réflexologique. Le constat du caractère finalisé et "quasi-intentionnel" que présentent les mouvements de l'animal "privé de sa tête" avait conduit Pfluger à suggérer l'existence d'une "âme spinale". Ziehen (cité dans Fearing, 1930), plus soucieux de respecter l'orthodoxie réflexologique, avait proposé le terme de "déflexe" pour désigner une catégorie d'actes moteurs "qui partagent

avec les réflexes l'absence caractéristiques de concomitant psychique mais qui ont des vicariances et des capacités adaptatives les rapprochant des actes volontaires". L'existence d'actes automatiques exécutés inconsciemment fut également, dès la fin du siècle dernier, clairement prise en compte par la clinique neurologique. Les anciens auteurs ont, d'ailleurs, très tôt fait la distinction entre automatismes innés (nous dirions aujourd'hui génétiquement précâblés) et automatismes acquis résultant des processus d'apprentissage.

Ces derniers posent, en effet, l'important problème des capacités d'enrichissement du répertoire moteur primitif. Lorsque le problème moteur posé à l'organisme dépasse les ressources de l'auto-adaptation sensori-motrice, le recours à un niveau supérieur de contrôle est alors nécessaire. Ce qui nous amène à considérer la nature et les propriétés du compartiment "cognitif" de notre schéma.

## 2. Les traitements cognitifs

Le domaine du contrôle psychique de l'action est resté, jusqu'à une période récente, à peu près totalement négligé par les approches neurophysiologiques traditionnelles prisonnières du modèle réflexologique.

C'est à la neuropathologie que l'on doit, en fait, le premier modèle interprétatif consistant du mode d'intervention des structures cérébrales dans le contrôle volontaire de l'action. La double, observation de Jackson (1866) de malades qui perdent leur capacité d'exprimer un acte intentionnel tout en gardant la faculté de déclencher automatiquement ce même acte dans un contexte habituel devait ouvrir la voie. Mais c'est à Liepmann que l'on doit en 1900 la première description soigneuse du syndrome qu'il devait qualifier d'*apraxie* (voir la revue de Signoret et North, 1979). A partir de cette analyse systématique des troubles praxiques, Liepmann allait proposer un modèle de fonctionnement sériel à 3 niveaux en relation avec des sites lésionnels différemment localisés dans les structures cérébrales.

Au premier niveau, Liepmann supposait l'existence de "*formules kinétiques*" acquises par l'expérience et engrammées dans les régions prémotrices. La lésion de ces régions conduit à observer l'amputation de certaines actions spécifiques appartenant au répertoire des habitudes apprises. Cette amputation caractérisait les troubles de l'*apraxie motrice*. Elle touche curieusement, et de façon élective, certains gestes habituels appartenant au registre symbolique ou associés à l'usage d'instrument. Elle imposait l'idée d'une localisation précise et circonscrite des réseaux nerveux impliqués dans ce que nous appellerions aujourd'hui la programmation de ces activités.

Au second niveau, il plaçait une *activité "transactionnelle"* capable de mobiliser les formules kinétiques du niveau précédent sous l'influence d'une "idée motrice", d'une image mentale de l'acte



à réaliser. Il qualifiait ce syndrome d'*apraxie idéo-motrice* et l'associait à une lésion des régions pariétales postérieures. Ce syndrome se traduisait en clinique par l'incapacité de mobilisation intentionnelle et sur ordre de l'acte mais préservait par contre le déclenchement automatique du même acte dans un contexte émotionnel ou familial. Le support de "l'idée" est ici intact ainsi que la formule kinétique, c'est le processus de liaison entre l'idée et l'acte qui serait touché.

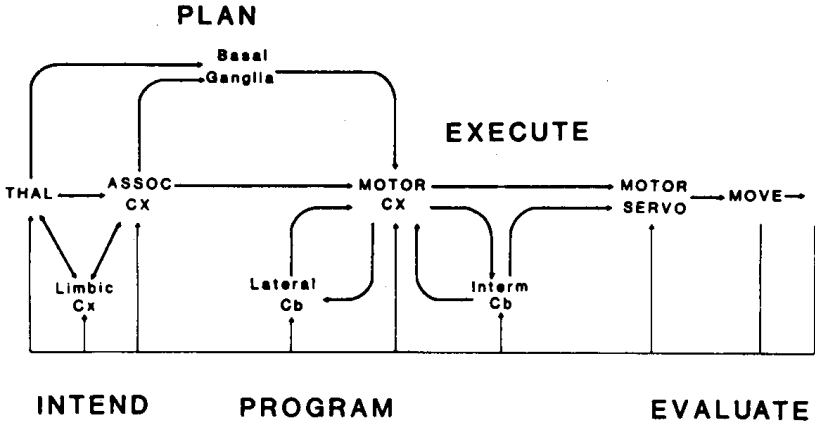
Au troisième niveau enfin, Liepmann envisageait une représentation mentale de l'acte projeté, un *schéma d'action* contenant la planification opérationnelle des actions et l'ordre de leur succession dans le temps. Ce syndrome, qualifié d' "*apraxie idéatoire*" associé à des lésions plus imprécises, laisse le sujet incapable de concevoir le geste à accomplir et le conduit notamment à enchaîner des actions partielles par ailleurs correctement exécutées mais dans un ordre incohérent.

Nous avons confronté ailleurs en détail les implications d'un tel modèle avec l'état actuel de nos connaissances du fonctionnement cérébral (Paillard, 1982b). Nous en retiendrons ici seulement les données essentielles qui se trouvent résumées dans le schéma de la figure 3.

Le niveau exécutif de ce modèle se confond approximativement avec le compartiment sensori-moteur décrit précédemment. Le cortex moteur exerce son contrôle sur ce niveau avec l'assistance des boucles paléo-cérébelleuses qui assurent la conformité des ajustements posturaux et cinétiques requis par l'action avec les exigences et les contraintes de la machinerie câblée qui produit ce comportement. Nous reviendrons dans la, troisième partie sur le rôle que joue le système pyramidal dans cette mobilisation du niveau exécutif de l'action. Ce qui doit ici retenir notre attention c'est l'organisation des opérations qui intéressent le compartiment proprement cortical et que nous assimilons, au moins provisoirement, au siège des traitements "cognitifs" de notre schématisation initiale.

En accord avec le schéma de Liepmann, on peut y distinguer trois niveaux d'opération : celui des "formules kinétiques" tout d'abord nous amène à considérer le rôle des structures motrices et prémotrices, non pas comme dépositaires de "programmes câblés" similaires à ceux qui ont été identifiés au niveau sensori-moteur, mais comme siège de *processus dynamique de programmation* des commandes destinées à moduler l'activité des modules câblés du niveau exécutif. Les boucles néo-cérébelleuses assureraient ici un rôle essentiellement dans l'initiation, la production et l'arrêt de ce processus génératif du programme d'action. L'idée aujourd'hui admise de l'organisation modulaire du cortex moteur permet de comprendre la ségrégation des troubles de l'apraxie motrice qui peut atteindre électivement certaines classes d'habileté motrice en préservant les autres. Ce qui caractérise donc ce premier niveau c'est son rôle d'interface entre des opérations de planification du niveau supérieur et les opérations d'exécution du niveau inférieur.

**Figure 3.** Schéma des opérations sérielles conduisant à la réalisation d'un acte intentionnel.



A droite du schéma le compartiment d'exécution (exécute) agissant sur le servo-moteur (servo-motor) responsable du mouvement (move) par le jeu des circuits câblés bénéficiant de leur boucle d'assistance et du rôle du paléocervelet (interm. ceb.) dans l'ajustement des paramètres de l'exécution aux contraintes posturales et environnementales. Le cortex moteur représente le carrefour de convergence des opérations du niveau cognitif où l'on distingue les opérations de programmation (program) empruntant les circuits de la boucle néocérébelleuse (lateral Cb) et les opérations de planification qui, au niveau des structures striaires (basal ganglia), confrontent les spécifications des objectifs de l'action élaborées dans les aires associatives frontales (Assoc. Cx) et les évaluations des contextes spatiaux et posturaux sur l'état de l'environnement et du corps réalisées au niveau des aires associatives pariétales (Assoc. Cx). Le dernier étage qui associe le cortex limbique (lumbic Cx) et les structures intralaminaires du thalamus (thal) est le siège des évaluations conscientes, des contrôles attentionnels et intentionnels contrôlant les opérations sous-jacentes (d'après Paillard, 1982b).

Le *processus de programmation* doit assurer le codage de l'action sous trois aspects principaux : prescriptions de la configuration des muscles à activer (codage d'adresse), spécification des paramètres temporels, de l'ordre séquentiel d'activation des muscles, et prédétermination de l'intensité des forces à produire (codage fréquentiel). Les activités unitaires des neurones des régions prémotrices et motrices reflètent en effet les exigences de ces trois types de codage des commandes.

Ce processus de programmation est lui-même dépendant des opérations de planification du niveau supérieur.

Les *opérations de planification* résultent également d'un processus dynamique où interviennent principalement les structures striaires par le jeu d'une boucle qui associe les secteurs frontaux et pariétaux du cortex avec les aires prémotrices.

Les aires associatives frontales contribuent pour leur part à la définition des objectifs de l'action (image du but) en confrontant les informations signifiantes de l'environnement avec celles stockées en mémoire en relation avec les intérêts et priorités en référence au système de valeurs de l'individu.

Les aires associatives pariétales de leur côté sont impliquées dans l'évaluation de contextes spatiaux et posturaux imposés par la situation environnementale et l'état actuel du corps.

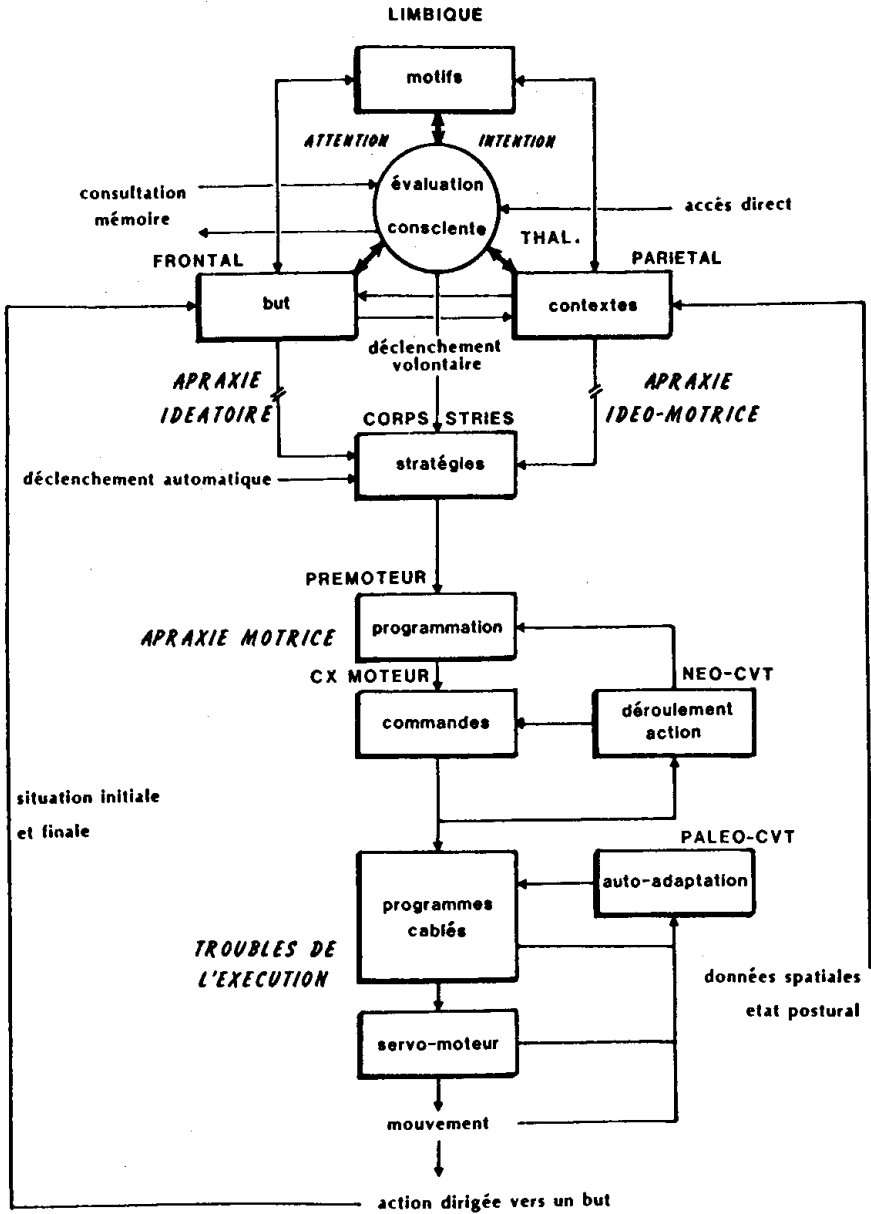
La convergence vers les structures striaires de ces informations sur le but de l'action et sur ses prérequis contextuels conduit, à ce niveau, au choix de la stratégie à mettre en oeuvre pour atteindre le but prescrit en fonction du contexte. Du choix de la stratégie va découler la prédisposition spécifique des structures programmatrices du niveau sous-jacent.

Une fois l'acte accompli, celui-ci sera évalué (au niveau frontal) par ses effets sensoriels comme conforme ou non-conforme aux conséquences sensorielles prévues et anticipées dans le projet d'action. De cette comparaison va résulter soit la cessation de l'activité, si ce retour sensoriel correspond à ce qui était attendu, soit un changement de stratégies, si l'objectif non atteint est maintenu; soit enfin un changement du projet d'action lui-même. Nous ne pouvons développer ici les arguments neuropathologiques, neuro-anatomiques et expérimentaux qui supportent une telle analyse. On se reportera à la revue générale qui en a été faite ailleurs (Paillard, 1982b).

Si les récents progrès réalisés dans notre connaissance du fonctionnement des aires associatives pariétales commencent à éclairer la nature du support nerveux du traitement des informations contextuelles, par contre le problème de "l'image du but" et de son élaboration présumée dans les aires associatives frontales restent encore mal compris.

Les techniques actuelles de recueil, au cours de la réalisation d'un acte biologiquement significatif, des activités unitaires de neurones isolés, viennent d'ouvrir de nouvelles perspectives. L'affectation à ces activités nerveuses de labels spécifiques correspondant à des caractéristiques comportementales identifiables telles que l'attention, la finalité de la tâche, la récompense, les paramètres d'exécution du mouvement (force, direction, distance) ou les caractéristiques du stimulus, la stratégie, permet de mieux préciser la contribution respective des grands secteurs de l'activité corticale à l'élaboration, la planification, la programmation et l'exécution de l'action (voir figure 4).

**Figure 4.** Schéma simplifié des opérations impliquées dans le contrôle de l'action.



Ce schéma ne comprend que les structures efférentes sans référence explicite aux circuits d'afférentation des structures concernées. Cortex limbique. Structure réticulaire et intralaminare du Thalamus : THAL. Cortex associatif frontal. Cortex associatif pariétal. Corps striés (ganglions de la base). Cortex prémoteur. Cortex moteur. Néo-cervelet : Néo-cvt. Paléocervelet : Paléo-cvt (voir commentaires dans le texte.)

La conception de l'organisation modulaire des activités corticales, qui se précise, confronte aujourd'hui les Neurosciences à une vision microlocalisationniste du fonctionnement cérébral. Elle renforce assurément l'espoir d'une nouvelle réduction de la complexité de l'organisation cérébrale et l'attente de nouveaux succès pour les démarches analytiques.

Le développement récent des nouvelles techniques d'imagerie cérébrale (RMN), malgré leur limitation présente, peut apporter à l'exploration de la dynamique des activités mentales les nouveaux indicateurs biologiques nécessaires à sa progression.

Que dire, enfin, du problème de la volonté, de la conscience, de l'attention ? On trouvera dans un article récent (Paillard, sous presse) les échos d'un courant récent de recherches qui traduit le renouveau surprenant d'intérêt des Neurosciences pour l'étude de ces dimensions fondamentales de l'activité psychique. Qu'il nous suffise de dire qu'on commence à entrevoir les corrélats nerveux de cette expérience singulière que nous qualifions de "consciente", ouvrant ainsi la voie à une meilleure intelligibilité de son rôle comme agent organisateur et régulateur de nos perceptions et de nos conduites.

### **3. L'interdépendance des compartiments sensori-moteurs et cognitifs**

La ségrégation des activités de traitement en deux compartiments pose le problème des interactions fonctionnelles qui s'établissent entre eux.

Les capacités de fonctionnement automatique du compartiment sensori-moteur sont évidentes et le répertoire de ses "savoir-faire", hérité d'une longue histoire évolutive des espèces, couvre le champ des réactions nécessaires et suffisantes pour assurer la survie des organismes dans un environnement prévisible. Un principe de moindre dépense énergétique qui domine tout le fonctionnement de la machinerie métabolique, semble avoir orienté la préadaptation des instruments sensori-moteurs de base de celle-ci comme il guide l'intervention de ses processus adaptatifs. Le compartiment cognitif, dont l'extension va de pair avec l'accroissement des capacités cérébrales, vient enrichir les capacités du premier mais voit ses activités dirigées par un principe de moindre charge de "l'évaluateur conscient" clairement identifié comme un canal de traitement à capacité limitée. C'est un principe que l'on voit à l'oeuvre dans tout processus d'apprentissage qui tend toujours à confier le maximum de contrôle aux instruments de pilotage automatique de l'action afin de minimiser le coût des contrôles attentionnels.

Mais le pilotage automatique se résume-t-il au fonctionnement du compartiment sensori-moteur tel que défini dans notre schéma ? Certainement pas. Le fonctionnement cognitif a aussi ses automatismes, ses traitements parallèles, ses modules câblés qui

assurent le déroulement et l'enchaînement des opérations mentales selon des règles précises inscrites dans le plan du câblage cérébral.

L'apprentissage moteur, nous l'avons vu, suppose la mobilisation de configurations d'activités nouvelles, non initialement présentes dans le répertoire câblé primitif du compartiment sensori-moteur. Quoiqu'il en soit du statut de ces "programmes acquis" et de la nature du processus actif qui les engendre, le problème de leur actualisation dans le compartiment exécutif du système se trouve posé.

Le rôle du système pyramidal comme vecteur d'expression de ces habiletés motrices acquises, au niveau exécutif du compartiment sensori-moteur, a pu être invoqué. Il était classique de considérer que les réponses conditionnées nouvellement acquises ne sont pas affectées par une pyramidotomie (du niveau bulbaire tout au moins !). D'intéressantes expériences de Ioffé (1973) chez le chien montrent que la pyramidotomie n'affecte que les réponses acquises qui impliquent une incompatibilité avec les blocs fonctionnels précâblés du tronc cérébral et laisse intactes celles qui empruntent pour leur exécution les montages préétablis de ce niveau (voir revue dans Paillard, 1982a). On citera également l'important travail de Hefner et Masterton (1975) sur 69 espèces de mammifères, indiquant les corrélations existant entre l'importance et la distribution des voies pyramidales et les capacités manipulatives de l'espèce, mais aussi ses aptitudes au dressage acrobatique, c'est-à-dire à l'acquisition d'habiletés motrices non compatibles avec les productions prescrites par les circuits câblés du compartiment sensori-moteur (Paillard, 1978). On peut évoquer, enfin, les observations anciennes de Scherb (citées par Paillard, 1960), sur des patients ayant subi, dans un but de restauration des capacités mécaniques du membre inférieur, des transpositions tendineuses qui obligent à distribuer les commandes motrices d'une manière non conforme aux coordinations primitives du niveau spinal (faire fonctionner par exemple un muscle fléchisseur en synergie avec les extenseurs de l'articulation). Le sujet peut, après entraînement, parfaitement assurer le contrôle volontaire de cette coordination nouvelle, et assurer sous contrôle attentionnel une locomotion correcte, mais la coordination ancienne (et par conséquent fonctionnellement non adaptée du fait de la transposition des tendons) réapparaît aussitôt lorsque la marche devient automatique. Ceci démontre la prégnance fonctionnelle des montages du compartiment sensori-moteur en fonctionnement automatique, mais aussi la puissance d'intervention du contrôle volontaire sur les mécanismes spinaux.

Les auteurs anglo-saxons utilisent actuellement le terme de "tuning" pour désigner ce type particulier d'influence. Au sens propre, il s'applique à l'activité d'accordage d'un instrument de musique où le réglage de la tension des cordes permet de modifier le son qu'elles émettent lorsqu'on les pince et de les mettre en harmonie. Mais cette image ne serait suggestive de l'intervention des contrôles volontaires sur les montages rigides de la moelle que si l'on suppose ce réglage

de tension comme non permanent et ne survivant pas à l'activité qui suscite cette tension ; le module passagèrement accordé à la finalité de la commande volontaire reprenant aussitôt sa fonction primitive.

On reconnaît, en fait, au système pyramidal trois modes d'intervention (voir revue de Paillard, 1978). La première consiste à court-circuiter les modules câblés du compartiment sensori-moteur en agissant directement sur le clavier des motoneurones spinaux où ils peuvent jouer des mélodies cinétiques originales (voies cortico-motoneuronales). C'est, par exemple, ce qui peut rendre compte de l'habileté digitale et du pouvoir original de création de l'instrument manuel. Ce contingent des voies pyramidales représente cependant une faible proportion de cet important faisceau de voies descendantes (3 %). La majorité des fibres qui le composent concerne, en fait, soit le contrôle centrifuge des relais sensoriels, soit la modulation interne de l'activité des modules câblés du tronc cérébral et de la moelle. Ce serait donc au niveau de ces boucles internes de contrôle qu'il faut rechercher le support des opérations de "tuning" caractéristiques du contrôle des étages supérieurs du système nerveux sur le fonctionnement des niveaux sensori-moteurs de l'exécutif.

On doit enfin s'interroger sur l'influence qu'exerce en retour le fonctionnement du compartiment sensori-moteur sur les opérations cognitives.

Comme nous l'avons vu, l'acte moteur n'est pas simplement la réponse passive d'une machinerie bien rodée à une stimulation d'origine externe ou à une incitation d'origine interne. Tout acte moteur est cause d'une modification du champ sensoriel auquel l'organisme accède par ses organes des sens. La notion de dialogue sensori-moteur traduit l'idée que ce n'est pas seulement l'environnement qui interroge le système mais que c'est aussi, et peut-être surtout, l'action motrice qui questionne l'environnement en suscitant sa réponse. Et ce sont précisément les réponses de l'environnement au questionnement moteur de l'organisme qui sont source de connaissance pour ce dernier. Piaget, déjà, ne nous rappelait-il pas que "connaître ne consiste pas à copier le réel mais à agir sur lui et à le transformer" ? C'est à travers les transformations du champ de relations que le système peut précisément en détecter les régularités et en extraire les invariances. En ce sens, les dialogues sensori-moteurs deviennent la source essentielle d'enrichissement d'une représentation interne abstraite du réel sensible dans les mémoires de l'appareil cognitif. Complémentairement, le dialogue qu'engage ce dernier avec ses mémoires devient l'instrument d'anticipation, de prévision, de décision et de contrôle qui confère à l'organisme ses capacités autonomes d'action et d'intervention sur le monde et d'enrichissement du dialogue sensori-moteur qu'il entretient avec lui.

L'idée que nous voudrions finalement défendre ici est que toute sollicitation du fonctionnement cognitif du niveau supérieur

implique nécessairement le recueil actif des informations à traiter et leur prétraitement éventuel dans les structures de filtrage des niveaux sensori-moteurs et que tout contrôle exercé par la cognition sur la programmation des activités comportementales ne peut s'exprimer qu'à travers les logiques câblées des modules d'exécution. En ce sens les structures sensori-motrices jouent un rôle d'interface, d'une part, entre les réalités physiques de l'environnement et les modèles internes que s'en constituent les activités cognitives, d'autre part, entre les projets d'action élaborés cognitivement et les productions motrices qui les expriment dans le monde physique. Une meilleure connaissance des ressources comme des contraintes de cette interface sensori-motrice devrait utilement contribuer au perfectionnement des stratégies éducatives.

## RÉSUMÉ :

*L'hypothèse d'une distinction fonctionnelle entre deux niveaux de traitement des informations par le système nerveux est ici proposée. Elle suppose l'existence de deux formes de dialogue entre l'organisme et son environnement : l'un direct par les boucles externes qui relient les informations sensorielles issues des réalités physiques du monde extérieur aux activités motrices qui les suscitent et les transforment ; l'autre indirect par les boucles internes qui alimentent le dialogue de l'appareil "cognitif" avec la représentation de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires. La compatibilité d'une telle distinction avec les acquis récents des Neurosciences et ses implications fonctionnelles pour notre compréhension des contrôles de l'action sont examinées.*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FEARING, F. *Reflex action. A study in the history of physiological Psychology*. Williams and Wilkins Cy, 1930. Réédition MIT Press, Cambridge, Mass., 1970, 350 p.
- JACOB, F. *La logique du vivant*. Paris : Gallimard NRF, 1970, 354 p.
- JEANNEROD, M. *Le cerveau-machine. Physiologie de la volonté*. Paris: Fayard, 1983, 203 p.
- PAILHOUS, J. Rôle des processus cognitifs dans le contrôle des actions sensori-motrices. In M. Laurent et P. Therme (Eds.), *Recherches en Activités Physiques et Sportives*, T1. Marseille : Publication du Centre de Recherche de l'UEREPS, 1985.
- PAILLARD, J. The pyramidal tract : two millions fibres in search of a function. *J. Physiol.*, 1978, 74, 155-164.



- PAILLARD, J. Le pilotage du moteur musculaire. La contribution des Neurosciences à l'étude des activités physiques et sportives. In G. Azemar et H. Ripoll (Eds.), *Eléments de Neurobiologie des comportements moteurs*. Paris : Editions INSEP, 1982, 9-35 (a).
- PAILLARD, J. Apraxia and the neurophysiology of motor control. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1982, B298, 111-134 (b).
- PAILLARD, J. Système nerveux et fonction d'organisation. In J. Piaget, J.P. Bronckart et P. Mounoud, *La Psychologie*. Paris : Gallimard, Encyclopédie de la Pléiade (sous presse, a).
- PAILLARD, J. Aspects neurobiologiques des fonctions d'utilisation du milieu. La main fabricatrice et le cerveau parlant. In J. Piaget, J.P. Bronckart et P. Mounoud, *La Psychologie*. Paris : Gallimard, Encyclopédie de la Pléiade (sous presse, b).
- PAILLARD, J. L'encodage sensori-moteur et cognitif de l'expérience spatiale. In J. Paillard (Ed.), *La lecture sensori-motricie et cognitive de l'expérience spatiale : Directions et Distances*. Paris : Ed. du CNRS, Comportements (sous presse, c).
- SIGNORET, J., NORTH, P. Les apraxies gestuelles. In *Rapport de Neurologie*. Paris : Masson, 1979.