

Revue de l'Education Physique Belge – 1977, XVII, 19-48

La machine organisée  
et la machine organisante

CONCEPTIONS RECENTES  
SUR LA NEUROBIOLOGIE DES FONCTIONS MOTRICES

par

Jacques PAILLARD

*(Université d'Aix - Marseille II - France)*

# **La machine organisée et la machine organisante**

## **CONCEPTIONS RECENTES SUR LA NEUROBIOLOGIE DES FONCTIONS MOTRICES**

**par**

Jacques **PAILLARD** (\*)

*(Université d'Aix- Marseille II - France)*

Je mesure à la fois l'honneur et le privilège, mais aussi la responsabilité qui m'échoit, d'avoir à ouvrir vos débats scientifiques n'étant compétent ni en matière d'éducation physique ni en pédagogie du sport. Je me présente à vous comme simple biologiste animé par la conviction que tout progrès dans vos domaines passe par l'indispensable dialogue et l'étroite collaboration entre le fondamentaliste et le praticien.

La compétence ordinairement reconnue au biologiste ou au médecin, s'agissant de l'organisme humain, est un peu comparable à celle du mécanicien qui connaît les organes de la voiture, qui sait comment marche le moteur, qui peut en détecter les pannes et, le cas échéant, y remédier mais qui garde généralement ses distances vis-à-vis du conducteur du véhicule.

Mais lorsque le biologiste devient neurobiologiste et qu'il se penche sur les performances de cet ordinateur extraordinairement complexe que constitue le cerveau de l'homme, il rencontre inévitablement dans sa quête de connaissances le tissu où s'élaborent les pensées, les désirs, les émotions et les actes intentionnels de l'individu responsable de la conduite du moteur biologique.

Le neurophysiologiste devient ici psycho-biologiste et sa démarche se fixe alors comme objectif essentiel la nécessaire réconciliation entre la personne humaine dans toutes ses dimensions - intellectuelles, affectives, sociales - et la machine biologique qu'elle habite et anime et dont elle reste étroitement solidaire.

Ce n'est pas, bien sûr, cet ambitieux projet que j'ai l'intention de développer ici. Mon propos se bornera à situer quelques-unes des issues nouvellement ouvertes par les progrès récents de nos connaissances du fonctionnement

---

(\*) Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II - Directeur de l'Institut de Neurophysiologie et Psychophysiologie du C.N.R.S.

Conférence inaugurale du Congrès international d'Education physique - Liège  
Avril 1977.

Tirages à part : Pr. J. PAILLARD - CNRS - INP 4 - 13274 Marseille - CEDEX 2 - FRANCE.

intégré du système nerveux. Ces progrès nous font entrevoir des terrains d'approche où le psycho-physiologiste peut désormais poser ses problèmes au niveau où l'éducateur pose traditionnellement les siens.

Le problème central que rencontre tout processus éducatif est celui de la malléabilité, de la « transformabilité » du système sur lequel il cherche à intervenir et celui des moyens à mettre en œuvre pour assurer l'efficacité de son intervention.

Dans quel but, à quel moment, de quelle manière, dans quelles limites avons-nous la possibilité d'agir éducativement sur la machine biologique ? Tel est le sens du dialogue qui doit s'engager entre l'éducateur physique et le psychobiologiste.

Mais pour engager un dialogue il faut d'abord disposer d'un langage commun. Aussi, importe-t-il, avant toute chose, de préciser un certain vocabulaire.

\*  
\* \*

## 1. QUELQUES DEFINITIONS.

1.1. Nous ferons constamment référence à deux aspects complémentaires et étroitement solidaires du fonctionnement des machines biologiques dotées d'un système nerveux :

- Celui de la **machinerie bio-énergétique**, d'une part, qui intéresse l'ensemble des fonctions dites métaboliques des systèmes vivants. Elle est au service de la satisfaction des besoins énergétiques essentiels à la croissance des organismes puis au maintien de leurs structures matérielles; elle est indispensable aussi au déploiement de leurs activités motrices dans le monde qui les entoure.

- Celui de la **machinerie bio-informationnelle**, d'autre part, constitué par un système nerveux assimilateur, intégrateur, distributeur de signaux. Elle est au service de la régulation des activités internes et devient l'instrument des relations qui s'établissent entre l'organisme et son univers d'action.

La première traite de **l'énergie**, la seconde de **l'information**. Chacune a sa logique, ses lois de fonctionnement, ses exigences, ses possibilités et ses limites d'adaptation et de transformation, ses capacités de résistance à la fatigue et à l'usure du temps.

1.2. Pour caractériser la modifiabilité du système nous userons de deux concepts précis qui demandent clarification.

Nous entendons par **flexibilité** du système la marge d'écart par rapport à sa norme de fonctionnement que le système peut tolérer en continuant d'assurer l'exercice correct de la fonction qu'il assume.

Nous réservons le terme de **plasticité** à la capacité que peut présenter le système de modifier durablement sa structure interne en acquérant une possibilité nouvelle de fonctionnement non prévue dans son plan de construction initial.

Nous distinguerons aussi les modifications plastiques qui intéressent la structure stabilisée en fin de croissance et celles qui relèvent de la **croissance** ou de la **maturation** du système au cours de son développement.

1.3. Nous introduirons enfin une distinction entre ce qui, dans les organisations vivantes, concerne l'expression d'un ordre existant tant au plan structurel qu'au plan fonctionnel, autrement dit leur part **organisée**, et ce qui relève de leur capacité de modifier l'ordre existant ou d'engendrer et d'accroître l'état d'organisation du système, autrement dit de leur fonction **organisante**.

La part « **organisée** » du système superpose à l'**ordre structural** les interactions dynamiques entre les éléments de la structure, interactions qui composent son **fonctionnement**.

Ce fonctionnement s'exprime dans des **actions fonctionnelles finalisées**, c'est-à-dire des performances de la machine qui ont une valeur biologique adaptative au regard des impératifs de survie du système lui-même.

La fonction « **organisante** » du système concerne sa capacité autonome de création d'ordre non initialement prédéterminé par son programme génétique d'auto-construction. Elle s'exprime dans une **auto-organisation non-programmée génétiquement** et s'alimente dans le dialogue ininterrompu qu'un organisme entretient avec son environnement par le truchement de l'acte moteur, instrument de conquête, de perfectionnement adaptatif et de progrès évolutif (Paillard 1976)

Nous envisagerons successivement ce qui, du point de vue de l'éducation physique, caractérise les propriétés de la machine bioénergétique organisée, puis celles de la machine bio-informationnelle sous son double aspect organisé et organisant. Nous évoquerons enfin les perspectives ouvertes en pédagogie par le modèle des systèmes auto-organiseurs.

\*  
\* \*

## 2. MODIFIABILITE DE LA MACHINE BIO-ENERGETIQUE.

Mon allusion à l'aspect thermodynamique du fonctionnement de la machine vivante sera brève non parce que son importance est mineure, elle est au contraire fondamentale et essentielle en matière de performance sportive, mais en raison de l'intérêt dominant et justifié qu'on lui accorde généralement

Les fonctions bio-mécanique, respiratoire, circulatoire associées aux fonctions de conversion et de transfert d'énergie sont assurées dans l'organisme par un ensemble d'organes et de tissus spécialisés ordonnés en des architectures précises.

Ceux-ci sont caractérisés par la **stabilité** de leur organisation, par la **fiabilité** de leur fonctionnement et par leur relative **flexibilité** adaptative.

2.1. Résultat d'une auto-construction génétiquement programmée, ces architectures représentent, en effet, dans la machine biologique des **structures stables** sélectionnées et conservées par les mécanismes

consolidateurs de l'évolution. Elles relèvent de la part **organisée** de la machine biologique. Toutes leurs règles de fonctionnement sont régies par le **principe de conservation** : stabilisation des normes fonctionnelles, maintien de la stationnarité des structures, lutte contre l'érosion thermodynamique et le vieillissement.

2.2. Le fonctionnement sans faille de cette machine est requis pour le maintien de l'organisme en vie. La **fiabilité** de ce fonctionnement est assurée grâce à un jeu de régulations automatiques. C'est la machine informationnelle qui assure les circuits de commande, de surveillance, d'assistance, de détection et de correction d'erreurs qui sont à la base de ces régulations. La fiabilité est aussi garantie par un luxe de dispositifs de sécurité en cascade et en parallèle obéissant à un **principe de redondance fonctionnelle**.

2.3. A la stabilité structurale de la machine et à la fiabilité de son fonctionnement s'ajoute enfin une remarquable **flexibilité fonctionnelle** au sens défini plus haut. En d'autres termes, l'exercice de la fonction tolère certains écarts par rapport à ses conditions normales d'exercice.

Le système peut réagir, dans certaines limites toutefois, aux variations de la demande énergétique, notamment de celles qui émanent des variations de régime du moteur musculaire, sans pour autant compromettre la stabilité de ses structures. Cette flexibilité adaptative relève d'un **principe de régulation cybernétique**.

2.4. Si l'on s'interroge maintenant sur la **modifiabilité** de cette machinerie bio-énergétique, on peut la reconnaître sous divers aspects :

A considérer le système en fin de croissance, nous savons l'importance que revêt l'exercice de la fonction pour l'entretien des organes en bon état fonctionnel.

Le système squeletto-musculaire est particulièrement sensible aux effets du « non-usage » et du vieillissement. La souplesse des articulations, la force maximale déployée par un muscle, sa résistance à la fatigue dépendent de l'exercice. Nous sommes là sur un terrain familier d'intervention de l'éducateur physique.

Mais c'est aussi la flexibilité du fonctionnement qui peut être modifiable. L'entraînement contribue à l'élargissement des marges de tolérance des systèmes fonctionnels, en particulier respiratoire et circulatoire. Ceux-ci deviennent capables d'accepter des charges fonctionnelles plus importantes, sans pour autant compromettre leurs capacités de retour rapide à l'équilibre normal.

Il faut souligner, ici, que ces gains ou pertes en efficacité ou en flexibilité du système ne s'accompagnent d'aucune transformation fondamentale de « l'organisation structurale » du système et des modalités de son fonctionnement. De plus, les microchangements des niveaux tissulaire et cellulaire ne modifient pas l'architecture globale structuro-fonctionnelle de l'organisme.

Voyons maintenant ce que le système nerveux apporte de spécifique au fonctionnement de cette machine.

### 3. LA MACHINE INFORMATIONNELLE ORGANISEE.

L'apparition puis le perfectionnement d'un système nerveux chez les êtres vivants s'accompagnent d'un accroissement à la fois de leur autonomie et de leurs capacités d'interaction avec le monde qui les entoure. Le système nerveux se développe, en effet, dans deux sphères fonctionnelles complémentaires : celle de la vie dite « végétative » au service de la cohésion interne de la machinerie métabolique et celle de la vie dite de « relation » où s'organise le dialogue sensori-moteur de l'organisme avec l'environnement.

Dans ces deux secteurs d'intervention, le système nerveux apparaît essentiellement comme un instrument d'interconnexion des éléments de la communauté organique d'un côté, de mise en relation de l'organisme avec les éléments de son milieu de vie de l'autre. En ce sens, le système nerveux apparaît comme une véritable machine à communiquer qui recueille, traite, mémorise, distribue, engendre de l'information. Or, le fonctionnement de cette « machine informationnelle » va dépendre, au premier chef, de sa structure interne de « connectivité », autrement dit, et pour utiliser le vocabulaire des électroniciens, de son « plan de câblage ».

La fiabilité de la machinerie métabolique repose, nous l'avons vu, sur une circuiterie pré-organisée de programmes de fonctionnement et de boucles de réglage génétiquement déterminés.

Mais le système nerveux va aussi organiser et coordonner le jeu des instruments comportementaux qui viennent prolonger et amplifier celui des grandes fonctions physiologiques de base. Nous rencontrons alors le problème des contrôles nerveux de la motricité.

3.1. Deux notions fondamentales s'étaient dégagées des approches physiologiques traditionnelles des fonctions motrices (7) :

- celle d'une machinerie spinale dominée par une organisation de **réflexes élémentaires** susceptibles de se composer en figures fonctionnelles plus ou moins complexes (Sherrington).
- celle d'une soumission de cette machinerie réflexe à une série de **contrôles supérieurs hiérarchisés** (Jackson).

3.1.1. La neurophysiologie moderne découvre aujourd'hui la notion de **programmes moteurs assistés**.

Ces programmes reposent sur l'existence d'une architecture de neurones aux interconnexions (jonctions synaptiques) rigidement câblées.

Ce câblage contient tous les détails de l'organisation spatio-temporelle d'une séquence motrice, fonctionnellement signifiante. Une fois déclenché, le programme peut s'exécuter correctement (bien que de manière stéréotypée) sans le secours d'informations sensorielles.

Les récentes études sur les programmes spinaux de la locomotion ou de l'équilibration ont démontré la réalité de ces « **modules fonctionnels** » précâblés et génétiquement inscrits dans le plan de construction du système nerveux.

Ces mêmes études ont aussi confirmé la présence d'une circuiterie réflexe très élaborée mais dont le plan de câblage répond en fait aux exigences d'une

assistance à l'exécution du programme central. Ainsi, les circuits réflexes apparaissent non plus comme des éléments de montage dont l'assemblage serait nécessaire à la construction des programmes d'action, mais comme les éléments de **boucles d'assistance** à l'exécution des programmes internes câblés.

Grâce à cette assistance, le programme peut tolérer une certaine marge d'imprévu dans les conditions de son exécution (réagir aux accidents du terrain dans le cas de la locomotion, par exemple). Autrement dit, le programme rigidement câblé dispose d'une certaine flexibilité adaptative dans son exécution. Si cette exécution vient à être requise dans des conditions rigoureusement stables et prévisibles, en tous cas conformes à l'écriture du programme dans le câblage nerveux, elle peut s'accomplir parfaitement « en boucle ouverte » et sans le secours d'aucune assistance réflexe.

La neurobiologie est activement engagée dans l'identification et le décryptage de ces modules fonctionnels précâblés qui constituent la part génétiquement organisée de la machinerie nerveuse.

La réalité d'un programme câblé est généralement démontrée par la possibilité de le déclencher au moyen d'une stimulation électrique d'un point « nodal » du système qui tient sous sa dépendance la structure d'interconnexions servant de support structural au programme. C'est ainsi que de nombreux programmes câblés impliqués dans l'expression de comportements fondamentaux liés à la nutrition, à la reproduction, à la défense ont leurs points nodaux identifiés dans le tronc cérébral, notamment dans les structures mésencéphaliques (7).

3.1.2. S'agissant maintenant de la notion d'**organisation hiérarchique** des commandes supérieures, loin d'être absente des préoccupations actuelles elle réapparaît sous la forme d'une conception d'emboîtement hiérarchique de modules fonctionnels mais où les relations d'interdépendance sont conçues davantage en termes de boucles solidarissant entre elles les structures modulaires diversement réparties aux divers étages du névraxe qu'en termes de stratification horizontale des niveaux fonctionnels. C'est ainsi que le cortex moteur n'apparaît plus comme un niveau supérieur d'élaboration des commandes volontaires mais comme une simple station de relais où convergent de nombreuses boucles internes à l'organisation nerveuse.

Par contre, la hiérarchie d'emboîtement des programmes câblés ressort avec toutes ses exigences contraignantes, ce qui n'est probablement pas sans conséquences en matière d'éducation physique.

La performance du chat qui se retourne pour retomber sur ses pattes est classique en physiologie et le positionnement automatique de la tête par rapport aux forces de gravité a été reconnu comme le premier chaînon indispensable à la réaction automatique de retournement du corps. Tous les travaux modernes réaffirment le rôle primordial joué par la tête dans l'organisation des postures et des mouvements du corps ou de ses segments mobiles orientés dans l'espace.

Pratiquement, tous les mouvements visuellement guidés dans l'espace vont dépendre du calibrage des informations articulaires cervicales et vestibulaires nées des réactions de centrage de la tête sur la direction du regard. Le pouvoir de contrôle de la position de la tête sur tous les programmes

moteurs du tronc et des membres se révèle très important, même chez l'homme, et il devrait y avoir intérêt à tenir compte, en matière de pédagogie sportive, des compatibilités ou incompatibilités existant entre la position de la tête par rapport au tronc et à la direction des forces de gravité et la position des membres dans le cadre des contraintes internes imposées par la dépendance hiérarchique des programmes câblés du système moteur primitif.

De la même manière, nous pourrions évoquer ici certains travaux de notre laboratoire (6) sur la subordination des mouvements du poignet et du coude aux mouvements de l'épaule telle qu'elle peut être mise en évidence chez l'homme au cours d'expériences de pointage d'une cible visuelle assorties d'une épreuve de recoordination des programmes moteurs consécutive à un déplacement de l'espace visuel par le port de lunettes prismatiques. Sans entrer ici dans le détail de ces expériences, nous retiendrons essentiellement l'idée qu'un système nerveux aussi élaboré que celui de l'homme a conservé dans son plan de câblage primitif les programmes hérités des formules motrices sanctionnées par la réussite de ses ancêtres quadrupèdes et consolidées dans la mémoire génétique. Cette part pré-organisée de la machinerie nerveuse contribue à la fiabilité du système biologique en le dotant « par construction » d'un répertoire d'actes moteurs préadaptés.

La présence d'un tel plan de câblage rigidement constitué ne va pas sans imposer quelques contraintes et des limites à la réalisation de performances nouvelles non incluses dans le répertoire primitif. Ce qui nous confronte au problème de la **modifiabilité** de ces montages précâblés, c'est-à-dire au problème de **l'apprentissage moteur**.

3.2. L'acquisition d'une habileté motrice nouvelle suppose la programmation sur le jeu du clavier moteur spinal d'une « mélodie cinétique » non initialement présente dans les modules câblés du système. En fait, le plan de câblage préexistant impose au clavier spinal des accords tout composés et une « harmonie » préétablie. Aussi, **l'apprentissage d'un acte moteur nouveau** va requérir un certain remaniement des blocs fonctionnels existants, donc des possibilités de contrôle interne du fonctionnement des modules câblés.

3.2.1. On évoquera ici les progrès récemment réalisés dans notre connaissance des fonctions du système dit **pyramidal**. Cette grande voie de connexion entre les aires motrices du néo-cortex et la machinerie spinale apparaît comme un des perfectionnements évolutifs majeurs des contrôles nerveux de la motricité. Le système pyramidal comprend, chez l'homme, près d'un million de fibres reliant chacun des hémisphères cérébraux à l'appareil moteur spinal. L'identification, parmi ces fibres, d'un contingent cortico-motoneuronal contrôlant directement les motoneurons des muscles de la main et des doigts avait mis l'accent sur l'une des fonctions les moins contestées du système pyramidal : comme **instrument des habiletés manuelles**. Le constat assez surprenant du caractère relativement mineur des déficits moteurs qui accompagnent la section complète de ces voies descendantes devait conduire à abandonner l'idée, longtemps restée classique, que ce système constituerait l'instrument privilégié du **contrôle volontaire** de la motricité.

En fait les travaux modernes ont montré qu'une part d'à peine 3 % du contingent des fibres du faisceau pyramidal était affectée au contrôle direct des motoneurones spinaux mais que la grande majorité des fibres qui le composent pouvait être considérée comme n'ayant pas de fonction motrice proprement dite. Elles se distribuent tout au long du névraxe sur les noyaux de relais des messages sensoriels, exerçant un véritable contrôle centrifuge de la sensibilité (voir fig. 1).

Une perspective nouvelle d'interprétation des fonctions du système pyramidal se trouve ainsi ouverte. Le rôle de celui-ci dans l'organisation motrice serait moins une programmation directe d'actions différenciées sur le clavier spinal qu'un contrôle des circuits d'assistance et des boucles sensorielles régulatrices de la motricité.

Des travaux récents semblent effectivement impliquer le système pyramidal dans le remaniement des câblages primitifs du tronc cérébral (7). Un chien que l'on conditionne en position tête haute ou en position tête basse, à élever la patte avant, ne conserve après pyramydotomie que la combinaison compatible avec les contraintes des câblages posturaux subordonnant la position fléchie ou étendue des pattes avant aux positions de la tête (réflexe de Magnus).

Ainsi, le système pyramidal peut apparaître aujourd'hui comme un instrument de dislocation et de subordination des blocs fonctionnels précâblés dans le système et par suite comme un instrument d'enrichissement du répertoire de programmes moteurs.

3.2.2. Le problème reste cependant posé de la nature des contrôles qui s'exercent soit au niveau des rétroactions régulatrices, soit au niveau des commandes déclenchatrices, soit encore au niveau du réseau de connectivité interne du module considéré. La question majeure reste de connaître le siège des modifications durables imposées à la structure du système. S'agit-il d'une réelle plasticité du plan de câblage primitif ou la plasticité doit-elle être recherchée au niveau de réseaux centraux programmeurs des opérations de contrôles évoquées ci-dessus ? Autrement dit, savons-nous aujourd'hui ce qui, du point de vue des activités nerveuses centrales, distingue une performance nouvellement réussie de son automatisation à l'état de trace durable consolidée dans le plan de câblage du système ? La réponse est clairement négative.

Mais on retiendra cependant que, contrairement aux programmes câblés du répertoire primitif que l'on peut évoquer électriquement à partir de certaines structures clés, jamais un automatisme acquis tel l'émission d'un mot, ou le graphisme d'une lettre ou d'une signature ou un automatisme gestuel quelconque, n'a, jusqu'ici, pu être déclenché électriquement au cours des nombreuses investigations des structures nerveuses centrales auxquelles se livre la neurochirurgie moderne; alors que, nous le savons, des imageries visuelles ou sonores parfaitement cohérentes et organisées peuvent être évoquées par des stimulations corticales chez l'homme. Le problème se trouve donc posé de savoir si les programmes acquis (les fameux engrammes moteurs) bénéficient du même type de formulation ou d'écriture dans le câblage du réseau de connectivité que les programmes génétiquement précâblés. D'une manière plus générale encore, la connaissance intuitive que

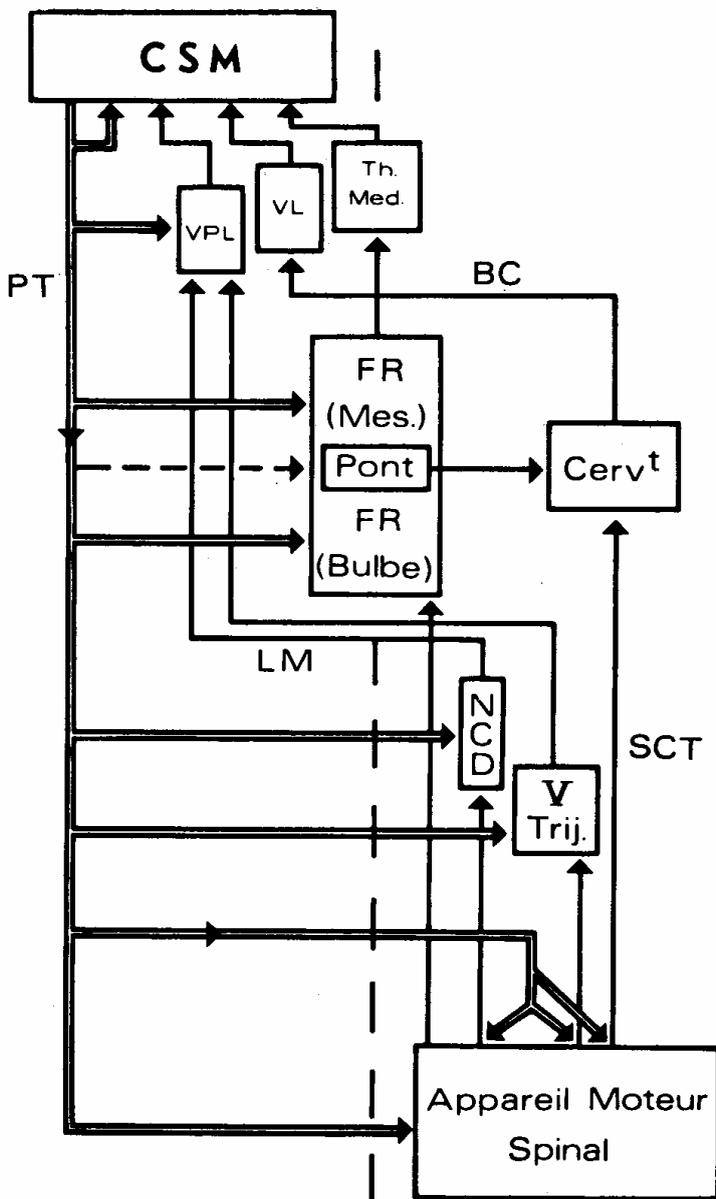


Figure 1. - Schéma des diverses boucles internes directement alimentées par des collatérales issues des voies corticospinales (PT) ou par des voies descendantes directes issues du cortex sensorimoteur (CSM). Thalamus médian (Th. Méd.), Ventrolatéral (VL). Ventropostérolatéral (VPL). Formation réticulée (FR). Mésencéphale (Més.). Lemnis médian (LM). Noyaux des colonnes dorsales (NCD). Noyaux du trijumeau (V. Trij.). Voie spinocérébelleuse (SCT) (d'après Wiesendanger in J. Paillard, 1976 a).

nous pouvons avoir de cette machinerie motrice en action nous indique que bien souvent c'est moins la trajectoire précise, donc câblée, de tels mouvements qui est importante à prendre en considération que la valeur structurante, organisatrice de l'objectif fixé à l'action. Le même objectif peut être atteint par des stratégies et des combinaisons de mouvements divers mais c'est toujours le même acte finalisé.

La physiologie de la machine organisée avec son répertoire de programmes consolidés et ses régulations cybernétiques peut difficilement rendre compte de cette plasticité adaptative très étonnante dont notre système nerveux paraît capable. Ce qui nous amène à envisager cette incursion, assez prospective, et peu conformiste il faut bien le dire, dans le domaine des fonctions d'organisation et des propriétés de la part « organisante » de notre système nerveux.

#### 4. LES PROPRIETES DE LA MACHINE ORGANISANTE.

Le biologiste a toujours été très frappé des étonnantes capacités d'adaptation, de compensation, de restauration, de réorganisation dont un organisme vivant est capable. Une fonction est à l'œuvre qui subordonne toutes les fonctions physiologiques partielles à une règle d'unité et de cohérence qui les rend solidaires d'un certain « projet » commun.

La biologie moderne redécouvre aujourd'hui le problème de la spécificité de **l'organisation biologique** et se trouve confrontée aux finalités qui s'expriment dans l'exercice, par les systèmes vivants, d'une **fonction d'organisation**.

Organiser c'est mettre de l'ordre là où il n'y en avait pas ou modifier un ordre existant pour répondre à de nouvelles exigences ou normes ou à de nouveaux critères de valeurs. Organiser c'est, en fait, informer (mettre en forme) ou transformer (changer la forme existante). La fonction d'organisation suppose un effecteur, un instrument de mise en forme ou de transformation, une machine « organisante ». Elle suppose aussi une structure transformable.

Comme champ d'application de l'effecteur elle suppose, enfin, un système de référence dans lequel la transformation prend un sens, une valeur adaptative, dans lequel elle peut être jugée bonne ou mauvaise par rapport à un critère défini.

On comprendra que le problème est ici posé de manière très peu conventionnelle pour les approches biologiques classiques et que les solutions envisageables ne peuvent être qu'ébauchées ou entrevues à titre d'issues possibles. Il s'agit, en effet, rien moins que de résoudre le problème de la logique de l'organisation biologique.

Nous resterons modestement sur le terrain de certains faits expérimentaux qui nous paraissent susceptibles d'éclairer d'une part ce que peut être le fonctionnement de la machine organisante, au moins dans le secteur de la sensori-motricité tel que peut l'étudier le psychobiologiste, d'autre part

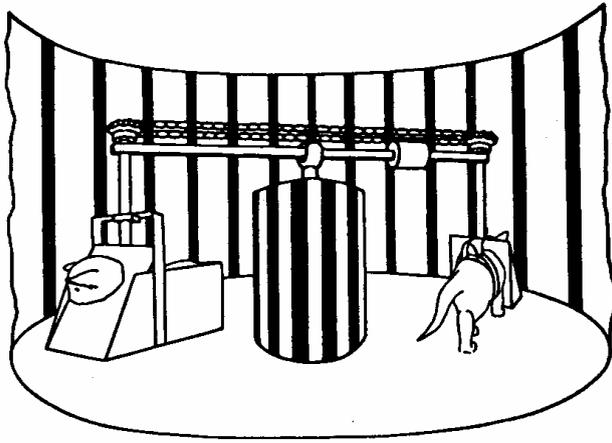
ce que peuvent être les lois de transformation de la structure modifiable du système nerveux, telles qu'elles sont actuellement accessibles au neurobiologiste.

**4.1. La plasticité des coordinations visuo-motrices** constitue un terrain de choix pour une approche expérimentale des problèmes d'organisation des connexions sensorimotrices au cours du développement ou de réorganisation adaptative chez l'individu adulte en fin de croissance. Nous insisterons plus spécialement sur les études qui ont mis l'accent sur le rôle organisant ou réorganisant de l'expérience motrice dans les manifestations de plasticité des coordinations sensorimotrices.

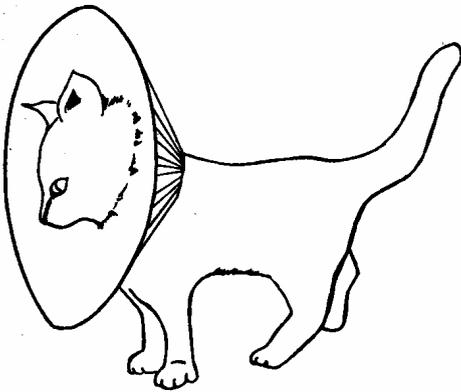
4.1.1. Alors que les conséquences de la distorsion ou de la restriction des entrées sensorielles ont fait, depuis longtemps, l'objet d'études comportementales, physiologiques ou anatomiques, ce n'est que dans une période récente que l'on s'est intéressé au problème des conséquences d'une **restriction sélective de l'expérience motrice** que l'animal peut faire sur le monde. Rappelons le principe de telles expériences inaugurées par Held et Hein en 1963. Des chatons sont élevés par paires dans l'obscurité depuis leur naissance. A partir de la quatrième semaine ils sont soumis trois heures par jour à une expérience visuelle d'un certain environnement standardisé. Le dispositif le plus classique est celui du fameux carrousel de Held et Hein (voir figure 2) qui permet de comparer le chaton qui associe son expérience visuelle du monde à l'expérience motrice active de ses propres mouvements dans cet espace visuel à l'autre chaton du couple qui subit passivement les transformations de l'univers visuel qui l'entoure sans les associer à sa propre activité. Alors que le premier chaton va ultérieurement présenter un comportement visuo-moteur normal, le second va présenter curieusement le comportement d'un chat aveugle, butant contre les obstacles, tombant à l'extrémité d'une table, incapable de localiser visuellement les objets et de diriger ses activités locomotrices sur la base d'informations visuelles alors qu'il peut le faire en référence à des signaux sonores par exemple. Ce chaton n'a pas **organisé** les coordinations visuo-motrices nécessaires au guidage visuel de ses déplacements.

Plus subtile encore apparaîtra la démonstration chez ces chatons de la nécessité d'organiser de la même manière la capacité de guider visuellement le mouvement de leurs pattes. Si un chaton est muni d'une collerette opaque l'empêchant de voir ses pattes en mouvement et que son comportement est ensuite comparé à celui d'un chaton subissant la même expérience mais porteur d'une collerette transparente autorisant la vision des pattes antérieures, on constatera un déficit spectaculaire du guidage des pattes chez le premier.

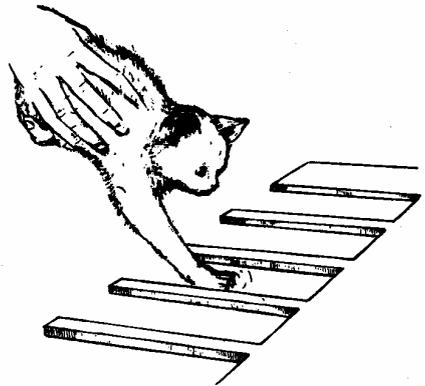
On notera que ces déficits ne sont pas irréversibles contrairement à ceux qui peuvent être notamment observés dans le domaine de la discrimination des formes visuelles. On assiste au contraire à des récupérations relativement rapides. Ce système d'ajustement visuo-moteur apparaît donc extrêmement plastique, ce qui lui permet de surmonter les difficultés qui naissent du changement constant des dimensions corporelles au cours de la croissance. On retrouve, d'ailleurs, chez l'adulte cette capacité d' « incorporation » aux segments du corps de prolongements artificiels (cane, outils, voiture) à



A



B



C

Figure 2. - A. - Dispositif expérimental permettant de soumettre deux chatons élevés depuis leur naissance à l'obscurité totale à une expérience visuelle identique associée, chez l'un d'eux, à une exploration active de son environnement et chez l'autre à un transport passif (d'après HELD et HEIN, 1963).

B. - Dispositif de restriction de la vision chez le jeune chaton au moyen d'une collerette opaque empêchant l'animal de voir ses membres en mouvement. Les animaux contrôlés sont équipés d'une collerette transparente.

C. - Test de placement visuel utilisant un plateau crénelé. La réaction d'extension des pattes vers la surface d'appui est présente initialement et ne nécessite aucune expérience mais le guidage correct de la patte sur la surface d'appui nécessite l'expérience visuelle du mouvement actif des pattes.

condition toutefois que **l'expérience active** du maniement de ces prolongements puisse être faite (voir à ce sujet J. Paillard, 1971).

Ceci nous introduit précisément au second champ expérimental, applicable à l'homme cette fois, et permettant d'aborder les fonctions organisantes de la motricité active.

4.1.2. Le prototype des expériences dites de « **décorrélacion sensorielle** » a été la célèbre expérience de Stratton des lunettes inversantes qui conduit, après leur port prolongé, à l'étonnante réorganisation que l'on connaît.

C'est encore à Held que l'on doit la systématisation d'une procédure expérimentale permettant d'aborder ce problème dans le cadre de la problématique de l'activité - passivité.

Le sujet est invité à pointer une cible visuellement repérée mais sans voir sa main mobile et, par conséquent, sans pouvoir apprécier ou corriger l'erreur qu'il peut commettre. On dispose donc d'une mesure de l'erreur moyenne qu'il commet et de la dispersion de ses pointés.

Le sujet est porteur de lunettes que l'on peut, à son insu, munir soit de verres normaux non déformants, soit de verres prismatiques qui déplacent le champ visuel d'une vingtaine de degrés vers la droite par exemple. On constate alors que le sujet pointe incorrectement, c'est-à-dire non plus cette fois sur la position physique de la cible mais sur la position où son système visuel localise l'objet. L'expérience consiste alors à comparer les effets des deux procédures suivantes:

a) On demande au sujet (toujours muni de ses verres prismatiques) de regarder sa main qu'il déplace activement dans le champ de son regard pendant quelques minutes; puis il est invité à reprendre ses pointés dans les conditions précédentes (c'est-à-dire sans vision de ses erreurs possibles et bien sûr en gardant les lunettes prismatiques).

b) On demande au sujet de regarder simplement sa main, que l'expérimentateur déplace passivement dans le champ de son regard, pendant le même temps que lors de l'expérience active; les pointages de contrôle sont alors effectués dans les mêmes conditions.

Les résultats montrent que, dans le second cas, le sujet continue de pointer incorrectement la cible visuellement déplacée alors qu'il pointe cette fois vers la position physique correcte de la cible après avoir fait l'expérience visuelle de ses propres mouvements.

Autrement dit, et comme lors de l'expérience des chatons, c'est la vision du membre activement mobilisé par le sujet qui apporte l'élément essentiel à la recoordination des programmes moteurs de déplacement des membres dans un espace visuellement déplacé.

On notera aussi que la réorganisation qui s'opère n'affecte pas qu'une trajectoire privilégiée ou une position déterminée de la cible, donc un programme moteur bien défini, mais qu'elle est généralisée d'emblée à tous les points de l'espace visuel et à toutes les trajectoires possibles pour les atteindre. Cette réorganisation toutefois est limitée aux jeux des articulations activées au cours de la période d'exposition. La réactivation de l'épaule bénéficie par exemple au coude ou au poignet mais l'inverse n'est pas vrai.

De même, la recoordination des positions de la tête sur le tronc bénéficie à l'ensemble des articulations des quatre membres (voir J. Paillard, 1971).

Nous sommes donc en présence d'un mécanisme adaptatif basal d'une grande importance pour la compréhension des modes opératoires de la « machine organisante ».

Nous retiendrons ici que la motricité active, contrairement au déplacement passif, réalise un couplage essentiel entre les commandes motrices et la transformation des entrées sensorielles qui vont résulter du mouvement lui-même. Les conséquences sensorielles de l'action sont ainsi prises en compte soit à posteriori pour le réglage de l'action en cours (rétroactions ou actions en « feedback », soit encore à priori pour la planification de l'action, pour sa préparation et son anticipation (actions anticipatrices en « feedforward »).

Nous ne pouvons développer ici toutes les implications de ce secteur de recherches actuellement en plein développement (voir à ce sujet J. Paillard 1971, 1976 a) qui semble rejoindre de plain pied un terrain de préoccupation majeure pour l'éducateur.

Il importe maintenant d'envisager l'autre terrain d'approche des problèmes de la plasticité au niveau structural cette fois, là où le neurobiologiste peut avoir l'espoir de nous préciser le point d'application privilégié des fonctions transformatrices qui opèrent dans le système nerveux.

4.2. Les modifications structurales du système nerveux qui relèvent de la propriété de **plasticité**, telle que définie précédemment, intéressent essentiellement les modifications du plan de câblage, génétiquement pré-déterminé, sous l'effet des contraintes extérieures ou des conditions qu'impose l'environnement à l'exercice de la fonction.

Nous touchons là l'un des thèmes de préoccupation dominante de la recherche neurobiologique actuelle. Les travaux modernes ont accumulé les expériences en faveur de l'existence d'un remodelage possible du réseau des connexions synaptiques à certaines phases critiques de leur développement. Je fais ici allusion à la série très remarquable de travaux consacrés à la maturation du cortex visuel chez le chaton, travaux qui ont montré qu'une exposition de quelques heures à un environnement visuel composé uniquement de lignes verticales, ceci entre la 5<sup>e</sup> et la 8<sup>e</sup> semaine du développement postnatal, pouvait radicalement et irréversiblement modifier le pourcentage des unités directionnelles du cortex visuel répondant à un stimulus déplacé verticalement.

Les périodes de sensibilité de la structure au remodelage semblent correspondre aux périodes de prolifération des arborisations dendritiques des neurones (voir fig. 3). Cette prolifération s'accompagne, en effet, d'un appel des terminaisons axoniques des neurones voisins avec constitution des boutons synaptiques de connexions interneuroniques.

L'idée dominante, ici, est celle d'une certaine **labilité connexionnelle**, d'une certaine souplesse permise pour la spécification des contacts synaptiques en fonction de l'usage requis pour la fonction, au moins à ces phases critiques du développement.

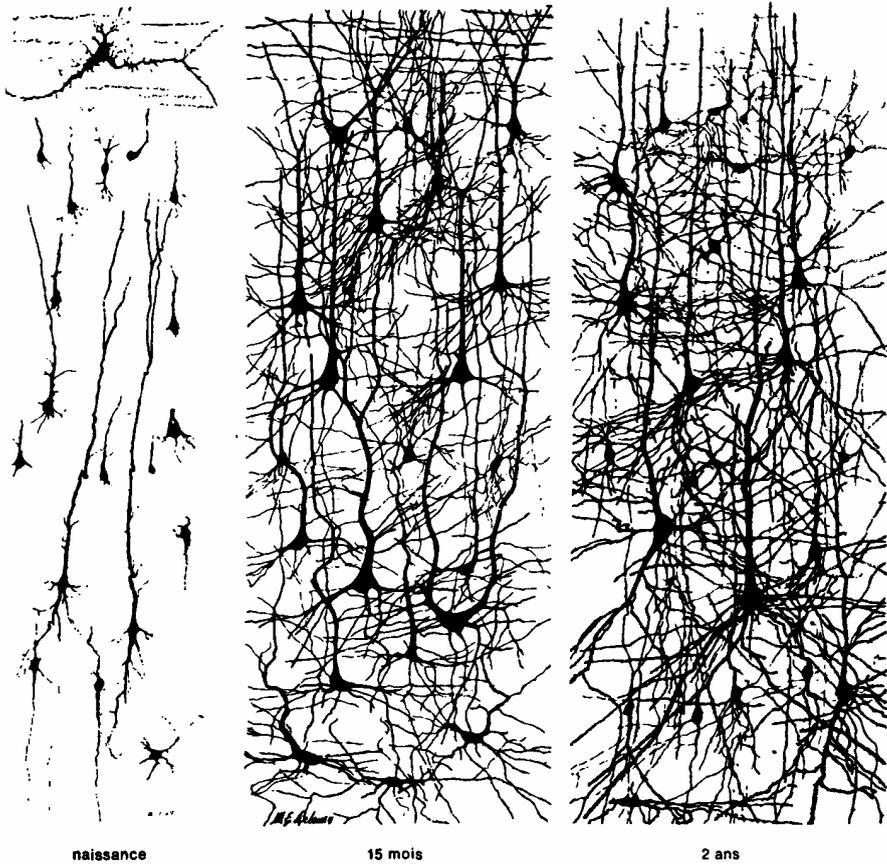


Figure 3. - Coupe histologique transversale au niveau du cortex moteur chez des nouveau-nés humains décédés à la naissance, à 15 mois et à 2 ans. On notera que le nombre des neurones reste approximativement le même, mais que la richesse des arborisations dendritiques va croissant (d'après Scholl).

La biologie moléculaire raisonne aujourd'hui en termes de médiateurs de la transmission synaptique (3). Les molécules de médiateur pour être efficaces doivent trouver sur la membrane du neurone des molécules d'accepteur dont l'état labile ou consolidé est aujourd'hui considéré comme conditionnant le pouvoir de transmission synaptique. L'existence de mécanismes de répression ou de dérépression de ce pouvoir d'acceptation des membranes offre un large éventail d'interprétations possibles des processus de remodelage plastique du réseau des connectivités nerveuses (voir fig. 4).

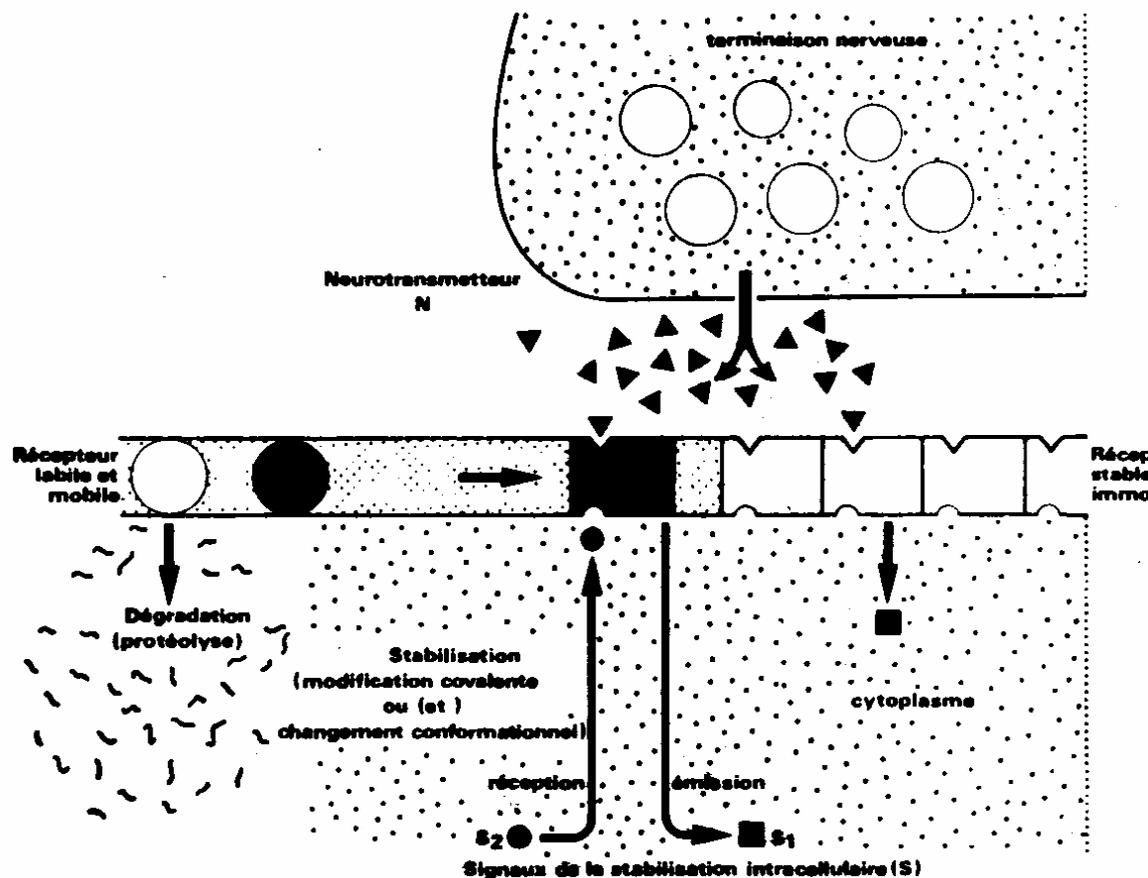


Figure 4. - MODELE MOLECULAIRE de réglage du pouvoir de transmission synaptique par stabilisation de la protéine réceptrice du neurotransmetteur libérée par la terminaison nerveuse de la fibre afférente. Selon ce modèle la protéine réceptrice existerait dans la cellule sous une forme labile et mobile. L'action conjuguée du neurotransmetteur (activité synaptique) et d'un signal encore hypothétique S provoque la conversion de la forme labile du récepteur en forme stable suivant un processus non encore identifié.

Ce modèle dû à Changeux (3) s'appliquerait à la stabilisation des synapses labiles immatures au cours du développement sous l'influence des activités nerveuses circulantes.

Selon Mark ce modèle pourrait être étendu au système mature par intervention de signaux internes de répression et de dérèpression du récepteur. Ce dernier conserverait ainsi un certain potentiel de modulation de la réceptivité synaptique ce qui permettrait un jeu étendu de remaniement de la configuration des connexions inter-neuronales (cité dans 9).

Il reste cependant à comprendre ce qui peut rendre compte des possibilités de remaniement plastique du réseau de connexions stabilisées qui caractérise la machine nerveuse organisée ayant achevé sa croissance et sa maturation.

Un courant de recherches d'une grande ampleur se développe actuellement en neurobiologie pour comprendre le support biochimique des capacités de mémoire, d'engrammation, de stockage de l'expérience acquise qui représente un aspect fondamental du fonctionnement cérébral.

4.3. Si nous tentons maintenant de revenir aux ambitieuses questions posées au début de ce développement sur la machine organisante, il est clair que nous restons sur notre faim et que nous manquons d'idées directrices susceptibles d'orienter de manière féconde les démarches expérimentales notamment celles qui pourraient nous permettre d'établir une corrélation entre les expériences du niveau comportemental et celles du niveau moléculaire.

Cette machine organisante que nous tentons de cerner voit son fonctionnement programmé tantôt par les déterminants génétiques, tantôt par les contraintes de l'environnement, voire par les instructions éducatives, mais nous le découvrons aussi apte à la création de « possibles non programmés », apte à l'innovation, autrement dit capable d'« auto-organisation ».

Il peut être intéressant d'évoquer à ce propos certains modèles théoriques de la biologie contemporaine issus des théories de l'information et de la théorie des automates et appliqués aux problèmes de l'intelligence artificielle.

## 5. LE MODELE DES SYSTEMES AUTO-ORGANISATEURS (\*)

Les développements de la cybernétique comme science des communications dans les machines naturelles ou artificielles ont conduit naturellement à s'interroger sur les similitudes et les différences entre ces deux sortes de machines. Sous l'impulsion de Von Neumann et de la théorie des automates est apparue la notion de **systèmes auto-organisateurs** pour désigner des machines cybernétiques à propriétés particulières présentant les caractéristiques des machines vivantes.

Le problème central restait de découvrir la logique interne de tels systèmes et les principes formels susceptibles de rendre compte de leur propriété d'auto-organisation.

5.1. Pour s'en tenir à l'essentiel des principes qui se dégagent d'une telle étude, on retiendra la prise en considération de trois facteurs fondamentaux : la **complexité**, la **redondance** et la **fiabilité**, auxquels viendra s'ajouter sous un aspect paradoxal et inattendu le **facteur bruit**.

5.1.1. Ces systèmes, en effet, ne peuvent voir émerger leurs propriétés auto-organisantes que s'ils sont suffisamment complexes c'est-à-dire constitués

---

(\*) Cette dernière partie comprend quelques extraits d'un chapitre rédigé par l'auteur dans le cadre d'un Traité de Psychologie actuellement sous presse (J. Paillard, 1977).

d'un très grand nombre d'éléments interagissants. Il existerait un **niveau critique de complexité** au-dessus duquel ils ne subiraient plus l'érosion dégénérative des systèmes physiques ordinaires mais acquerraient une capacité d'accroître leur organisation et de la maintenir en se nourrissant d'une part de l'ordre extérieur assimilable mais d'autre part aussi d'une énergie à bon marché constituée par les fluctuations aléatoires des contraintes de leur environnement.

5.1.2. La disponibilité dans le système d'un nombre suffisant d'éléments non spécifiés qui s'expriment dans une **redondance initiale** de caractère structural va conditionner, par ailleurs, les capacités d'évolution de ce système. Ces éléments redondants vont, en effet, alimenter les possibilités de différenciation et d'organisation par création de nouvelles contraintes interactionnelles. De ce point de vue, la redondance initiale du système exprime un certain « potentiel d'évolution » de celui-ci. Cette redondance de modules est aussi ce qui permettra au système de réagir aux facteurs de perturbation, de destruction, d'erreur susceptibles d'altérer son fonctionnement. En ce sens la disponibilité en redondance est également une garantie du maintien de la fiabilité du système.

5.1.3. **La fiabilité** du système, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il fonctionne pour assurer ses fonctions d'auto-construction puis de maintien de sa stationnarité, dépendra d'abord de la présence initiale d'une certaine « variété » de ses éléments dont les interrelations sont spécifiées en vue de réaliser les fonctions vitales essentielles. La présence de structures initiales préorganisées et préspecifiées, autrement dit d'organisation rigidifiée dans des mémoires structurales, va constituer un élément déterminant de la fiabilité des systèmes vivants.

5.1.4. L'évolution du système va dépendre de la mise en œuvre d'un processus organisationnel qui peut soit **incorporer de l'ordre extérieur** (cas de la nourriture énergétique pour la machine thermodynamique, mais aussi cas des programmes d'instruction injectés par l'éducateur pour la machine informationnelle), soit encore **créer de l'organisation** à partir des éléments non spécifiés qui caractérisent la redondance disponible du système.

On démontre, dans ce dernier cas, que ce sont les **actions aléatoires non programmées** qu'exerce l'environnement sur le système qui vont constituer le facteur important. Autrement dit, le « bruit » devient ici source de différenciation, donc d'hétérogénéité et par suite d'information dans un système initialement redondant qui accroît ainsi sa propre organisation.

On doit à Van Foerster l'introduction du principe de « **création d'ordre à partir du bruit** » qu'il a illustré de manière suggestive par un modèle analogique constitué de petits cubes à faces aimantées avec soit un pôle Nord, soit un pôle Sud dirigé vers l'extérieur. Tous ces éléments sont initialement redondants et disposés dans le plus complet désordre. Il suffit alors d'agiter la boîte de manière purement aléatoire pour voir les cubes s'assembler et s'organiser en arrangements structuraux complexes jusqu'à l'atteinte d'un état d'équilibre final stable correspondant à l'état d'énergie libre minimum. Aucun programme, aucune ordre préalable n'ont ici été injectés dans le système en dehors d'une « énergie non orientée à bon marché »

résultant des secousses aléatoires de la boîte contenant les cubes.  
(voir fig. 5).

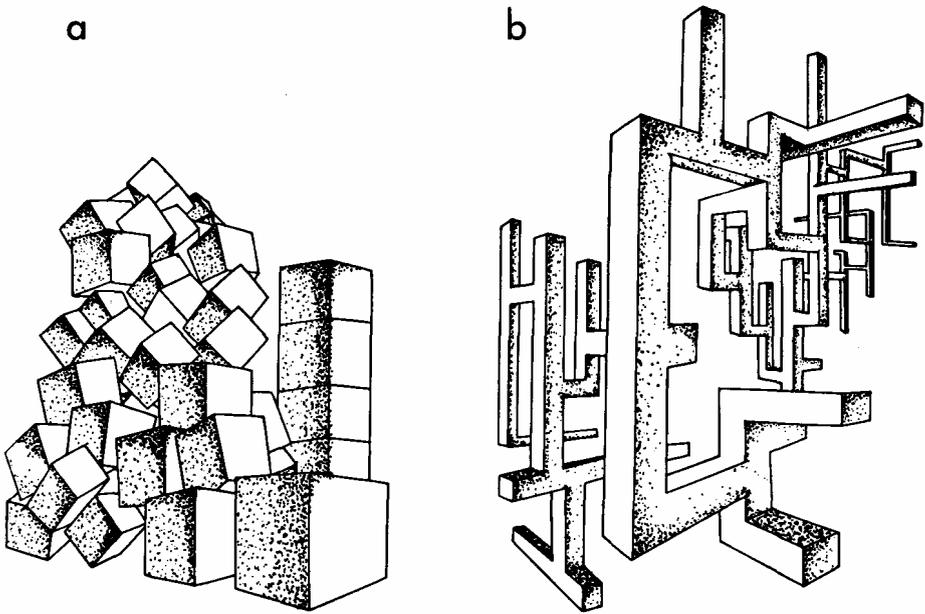


figure 5. - Illustration du principe de création d'ordre à partir du bruit par Van Foerster (cité dans 1). Les cubes à faces magnétisées sont présentés en a) avant et en b) après agitation de la boîte qui les contient. Voir commentaires dans le texte.

5.1.5. On trouvera dans l'ouvrage d'Atlan (1972) une formulation originale de la notion de **hasard organisationnel** dans la perspective ouverte par la théorie des automates.

La logique de cette théorie repose principalement sur l'idée que la propriété d'auto-organisation d'un système suffisamment complexe, redondant et fiable consiste en ce que les agressions aléatoires de l'environnement y produiraient deux effets opposés : d'un côté elles augmenteraient le désordre du système par accumulation d'erreurs dans la structure de ses constituants et dans la dynamique de son fonctionnement; de l'autre elles accroîtraient l'organisation du système par un accroissement des contraintes entre ses éléments redondants et par suite par enrichissement de sa complexité.

Atlan propose, précisément, de définir la complexité « non dégénérative au-dessus d'un certain niveau critique », qui caractérise l'émergence de la propriété d'auto-organisation, par cette faculté de réagir au bruit des deux façons opposées décrites sans cesser de fonctionner. Un certain taux de redondance initiale à la fois structurale et fonctionnelle est donc requis pour qu'un tel système existe pour à la fois alimenter le processus organisationnel et maintenir sa fiabilité.

L'évolution du système peut donc se traduire par la compétition des effets organisateur et destructeur du bruit. Son organisation maximum est atteinte lorsqu'il a épuisé le capital de redondance exploitable par le processus organisationnel, ce qui correspond à la phase de croissance et de maturation du système. Les facteurs de bruit, une fois la redondance épuisée, ne peuvent plus être que destructeurs, ce qui tend à engager le système sur la voie du vieillissement et de la mort.

5.1.6. C'est ici que l'on peut entrevoir la place singulière que va prendre dans les organisations vivantes un système nerveux organisateur des échanges informationnels internes nécessaires à la régulation cybernétique de ses fonctions métaboliques et qui va devenir l'instrument des interactions adaptatives entre l'organisme et son environnement. L'hypothèse d'un perfectionnement évolutif du cerveau qui pourrait atteindre chez les espèces les plus évoluées un degré de complexité susceptible de les faire accéder au statut de système auto-organisateur mérite d'être avancée afin d'en mesurer les implications pédagogiques.

5.2. En conformité avec le modèle que nous venons très schématiquement d'exposer, les exigences théoriquement requises pour qu'une organisation nerveuse acquière le statut d'un système auto-organisateur doivent être examinées du point de vue de la complexité, de la redondance, de la fiabilité et des capacités de réagir au bruit.

5.2.1. On retiendra, tout d'abord, du point de vue de la **complexité** le nombre énorme des composants structuraux du système nerveux capables de servir de support aux opérations de traitement de l'information. C'est à dix milliards qu'est estimé le nombre des neurones d'un cerveau humain. Si l'on tente, par ailleurs, d'estimer la richesse des interrelations entre ces éléments par le nombre des synapses identifiables, c'est le chiffre impressionnant de 100.000 milliards qui peut être avancé. Si l'on considère, en outre, qu'il nous faut ajouter à cette complexité structurale le nombre incommensurable de combinaisons discernables d'activités spatiotemporelles propagées dans ces réseaux complexes et qui servent de support à la dynamique fonctionnelle du système nerveux, on ne peut guère douter d'être en présence d'un système « extrêmement hautement complexe » tel que requis, selon Von Neuman, pour donner naissance, au sein même de la machine biologique, à l'émergence d'un processus auto-organisateur capable d'élaborer des formes d'équilibre fonctionnel tendant à la fois à se maintenir, à s'auto-entretenir et à réagir aux contraintes de l'environnement en se complexifiant et en s'adaptant.

5.2.2. S'agissant des exigences de la **redondance initiale**, on reste dérouté par la formidable complexité du problème que poserait la détermination génétique stricte de la totalité des interconnexions ( $10^{12}$ ) qui spécifient le plan de câblage de la machine informationnelle.

Le nombre des gènes contenus dans le stock chromosomique n'y suffirait théoriquement pas. Mais, alors que les systèmes nerveux relativement simples des espèces inférieures semblent bien strictement déterminés par le programme génétique, celui des espèces dotées d'un cerveau plus complexe

montre la persistance d'une labilité connexionnelle au cours de leur développement. Les premiers contacts synaptiques ne sont pas stables et un état labile précède généralement l'état rigide du système constitué de l'adulte (Changeux 1976).

Nombreuses sont aujourd'hui les expériences de neurophysiologie du développement qui confirment la possibilité d'appauvrir, d'enrichir ou même de modifier la densité ou l'organisation du réseau de connectivité en fonction des expériences précoces auxquelles on soumet l'organisme. Les célèbres expériences de Hubel et Wiesel, rappelées plus haut, sur le développement des neurones de l'aire visuelle du chat sont à cet égard particulièrement instructives. La mise en route spontanée ou provoquée de l'activité du système nerveux à un stade précoce du développement s'avère capable de sélectionner, parmi les multiples synapses labiles, celles qui seront stabilisées et donc spécifiées dans leur fonction. Des modèles moléculaires de cette stabilisation sélective sont aujourd'hui proposés. Il ne fait guère de doute, du point de vue qui nous intéresse ici, que cette labilité connexionnelle initiale présente tous les caractères d'une redondance initiale du système nerveux que l'activité du réseau nerveux contribuera à spécifier.

On retiendra surtout de cette analyse très succincte que la labilité connexionnelle synaptique au plan structural offre un vaste réservoir de redondance et de disponibilité pour la spécification de nouvelles configurations d'activité nerveuse.

5.2.3. La prise en considération du **facteur « bruit »** dans la machine informationnelle que constitue le système nerveux a le plus généralement conduit à envisager ses effets perturbants et désorganisateur. Dès lors que le modèle de fonctionnement auto-organisateur incite à rechercher la contribution positive et même nécessaire de l'aléatoire comme aliment du processus organisationnel, il importe de s'interroger sur les modalités d'intervention possible de ce facteur dans le fonctionnement nerveux.

On rencontrera d'emblée la difficulté d'une identification du caractère aléatoire des phénomènes caractérisables en tant que bruit. Il est banal de rappeler que l'aléatoire et l'imprévisible ne sont définissables qu'en termes d'incapacité de la structure d'accueil à reconnaître un ordre ou une régularité dans les phénomènes observés. Il s'agit donc d'une notion très relative qui ne peut préjuger de la non-existence d'un ordre physique sous-jacent et qui se réfère, en outre, aux seules capacités de l'observateur sans préjuger des capacités assimilatrices propres du système nerveux qui ne nous sont que partiellement accessibles.

Cette réserve étant faite, l'identification des sources éventuelles de « bruit » susceptibles d'influencer positivement le système nerveux en action ne peut, dans l'état actuel de nos connaissances, qu'être spéculative.

Parmi l'extrême diversité des objets et des phénomènes physico-chimiques présents dans la réalité physique du monde matériel qui nous entoure seule une infime partie est accessible à l'organisme à travers le filtre très sélectif de ses collecteurs d'information. Parmi tous les agents stimulants de nos divers organes de sens, seuls seront discernés comme ayant une valeur informationnelle ceux qui seront assimilables et reconnus comme signifiants par l'appareil de traitement.

# SYSTEMES ORGANISES

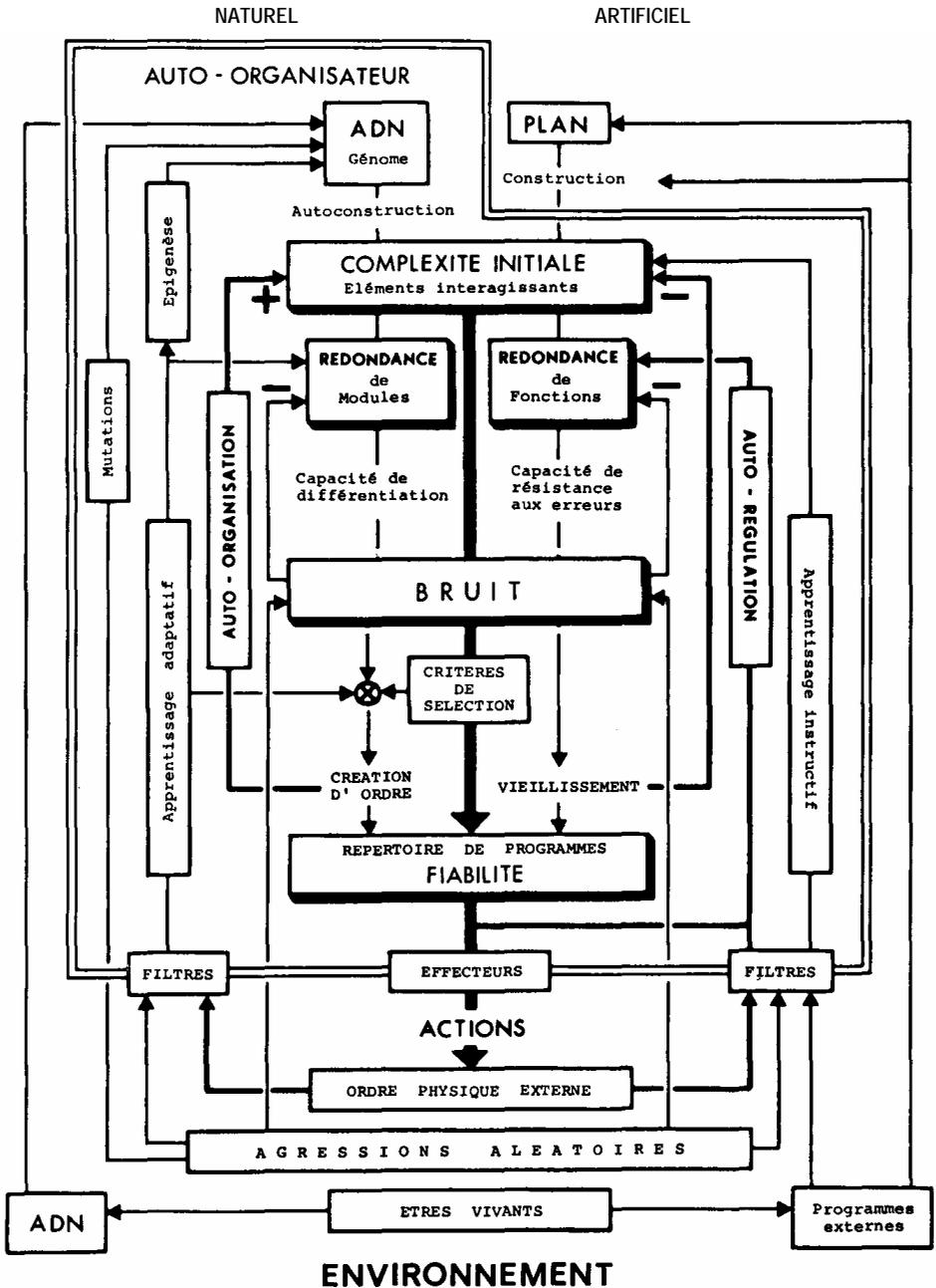


Figure 6. - SCHEMA GENERAL DES FONCTIONS INTERVENANT DANS L'EVOLUTION D'UN PROCESSUS ORGANISATIONNEL pour un système organisé naturel (S.O.N.) ou artificiel (S.O.A.).

L'environnement intervient 1) comme source d'ordre physique directement assimilable, 2) comme source d'agressions aléatoires («bruit»), 3) comme source de programmes externes (Plan de construction pour les S.O.A., A.D.N. pour les S.O.N.).

LA COMPLEXITE INITIALE résulte soit des processus d'auto-construction (S.O.N.) soit de construction par intervention externe (S.O.A.). Elle est source dans les S.O.N.

comme dans les S.O.A. de REDONDANCE FONCTIONNELLE exprimant un potentiel de résistance aux erreurs et conditionne la FIABILITE du système. Il s'y ajoute dans les S.O.N. une REDONDANCE STRUCTURALE source de diversité et de différenciation qui définit le potentiel d'évolution du système.

LE BRUIT peut être d'origine exogène ou endogène. Il peut avoir un double effet :

1) DESTRUCTEUR par diminution de la redondance fonctionnelle donc de la capacité de résistance aux erreurs. Il entraîne une diminution de la complexité initiale et de sa fiabilité, diminution de fiabilité que tendent à compenser les processus d'AUTO-REGULATION par boucles rétroactives. Au-delà d'une certaine diminution de la redondance se déclenche un processus de vieillissement.

2) CONSTRUCTEUR par diminution de la redondance structurale. Il est source de CREATION D'ORDRE par la mise en jeu d'un processus d'AUTO-ORGANISATION : il en résulte un accroissement de la complexité initiale.

La vexion du processus de création d'ordre est assurée par des FONCTIONS DE CHOIX assorties de CRITERES DE SELECTION.

LA FIABILITE du système repose sur l'existence d'un répertoire de fonctions programmées innées (S.O.N.) ou acquises (S.O.N. et S.O.A) consolidées dans le système. L'expression de ces fonctions en termes d'ACTION est réglée cybernétiquement par auto-régulation grâce aux boucles rétroactives internes ou externes (S.O.N. et S.O.A.).

LES ACTIONS (comportements, conduites) dirigées par le système sur l'environnement peuvent être sources soit d'informations réafférentes préorganisées et directement assimilables, soit de bruits FILTRES par les interfaces sensoriels du système. L'ENRICHISSEMENT DU REPERTOIRE d'actions, ou du répertoire de critères de sélection, peut résulter soit d'un processus d'APPRENTISSAGE AUTO-ADAPTATIF sollicitant par rétroaction le générateur auto-organisationnel (S.O.N.), soit d'un processus d'APPRENTISSAGE INSTRUCTIF par injection d'un programme d'origine externe (S. O. N. et S.O.A).

---

On peut, en ce sens, dire que l'aléatoire informationnel qui bombarde nos divers organes des sens va se trouver filtré dans les structures asservissantes d'abord des collecteurs sensoriels puis des structures de traitement central du système.

On retiendra, ici, qu'un grand principe de distribution des messages sensoriels dans le système nerveux repose sur la coexistence de voies divergentes de distribution où la distinction entre systèmes de **voies spécifiques** et systèmes de **voies diffuses** est aujourd'hui classiquement reconnue.

Diffus signifie absence de spécificité et donc conservation du caractère aléatoire, non organisé, de cette distribution centrale. C'est bien ainsi que l'on décrit les systèmes réticulaires du tronc cérébral comme collecteurs d'informations non spécifiques. Leurs neurones se présentent comme des lieux de convergence d'afférences sensorielles d'origines très variées qui entretiennent une activation tonique permanente dans l'organisme vigile. Ces structures, nous le savons, sont classiquement considérées comme une source « d'activation diffuse » : dans le sens ascendant en direction des structures cérébrales et dans le sens descendant en direction des structures spinales. On peut s'interroger sur la véritable signification de cette activation « diffuse » généralement considérée comme source de réglage des niveaux de vigilance. Il serait tentant de considérer ces structures comme des collecteurs de bruit alimentés par les divers canaux sensoriels. Ce bruit serait ainsi récupéré par les voies collatérales des grands systèmes de distribution spécifique. Connaissant, par ailleurs, l'importance de cette activation diffuse pour le fonctionnement

organisateur du système nerveux, on pourrait y voir une source d'activité aléatoire largement distribuée dans le système et permettant aux liaisons prévalentes d'extérioriser leurs configurations significatives; l'activation diffuse fournissant la matière à laquelle le jeu des activations spécifiques viendrait donner une forme. Cette mise en forme des activités centrales, autrement dit cette organisation, ne serait que l'asservissement d'un bruit activateur dans le réseau des circuits synaptiques à haut pouvoir de transmission.

Dans cette perspective, les conséquences désorganisantes, bien décrites, de la privation sensorielle pourraient être attribuées à une baisse de production de ce véritable générateur d'aléatoire que constitueraient les formations réticulaires.

La fameuse courbe à optimum reliant l'efficacité des performances au niveau d'activation pourrait aussi relever d'une interprétation cohérente dans le cadre de la compétition des effets organisateurs et perturbateurs du bruit.

On pourrait même s'interroger sur l'utilité de concevoir la différenciation d'un générateur d'aléatoire à l'intérieur même du système nerveux, au service de la machine auto-organisante. Les structures réticulaires du tronc cérébral pourraient constituer des candidats sérieux à une telle fonction. La stimulation électrique de ces régions est connue pour provoquer l'éveil de la fonction « organisante » du cerveau, autrement dit sa vigilance. Elle facilite, par ailleurs, la consolidation des acquisitions mnésiques et on pourrait, dans cette même ligne, interpréter le sommeil paradoxal comme résultant du fonctionnement du générateur de « bruit » en vue de la stabilisation des circuits corticaux fraîchement inscrits (le fameux processus de consolidation), voire même de la réactivation et de l'entretien des circuits existants.

Mais comment, dans cette ligne de réflexion, ne pas évoquer le rôle de l'activité comportementale exploratoire. C'est l'inconnu, le non familier, l'imprévisible, l'absence d'ordre qui suscitent la curiosité exploratoire de l'organisme et viennent alimenter le processus auto-organisant. C'est dans cette perspective que l'on peut considérer la valeur fonctionnelle du jeu chez l'enfant (Azémar, 1976).

5.2.4. Il importe, enfin, de ne pas sous-estimer les aspects perturbateurs indiscutablement reconnus aux facteurs de bruit et de s'interroger sur les moyens mis en œuvre par la machine nerveuse pour assurer la **fiabilité de ses performances**.

Cette fiabilité peut être altérée de diverses manières. Les neurones, au même titre que les autres éléments cellulaires de l'organisme, sont soumis aux impératifs de l'entretien métabolique de leurs structures et sont, en cela, très dépendants de leur approvisionnement en oxygène et en glucose. Le neurone est une structure fragile et probablement l'une des plus vulnérables de l'organisme. L'adulte perdrait définitivement quelques milliers de neurones chaque jour sans conséquences apparemment graves pour le fonctionnement de l'ensemble du système. Le fonctionnement spécifique des neurones dans le traitement et la transmission des signaux reste aussi très dépendant de la stabilité de la composition ionique de leur environnement et de la machinerie biochimique qui préside à la synthèse des médiateurs de la transmission

synaptique. Il est également soumis aux effets perturbateurs du bruit informationnel ce qui se traduit de manière variée au niveau des performances. Le tremblement moteur et la désorganisation d'activités, caractéristiques des états émotionnels, constituent certainement le meilleur exemple des effets perturbateurs du bruit informationnel sur le fonctionnement nerveux.

On ne s'étonnera pas de voir les systèmes auto-organiseurs se défendre contre les effets perturbateurs et destructeurs du bruit. Plusieurs stratégies sont utilisées pour lutter contre l'erreur ou la dégradation des informations transmises :

- Une première consiste à protéger les éléments structuraux, supports des informations régulatrices, en stabilisant leurs connexions et en augmentant leur pouvoir de transmission.

**La stabilisation des programmes câblés** constitue, en fait, un aspect du problème général de l'adjonction de mémoires aux processus auto-organiseurs. Ces mémoires permettent de figer les circuits responsables de certaines régulations sanctionnées comme efficaces. La fiabilité des grandes régulations fonctionnelles fondamentales liées à la satisfaction des besoins fondamentaux repose toute, comme nous l'avons vu, sur l'existence de programmes génétiquement câblés. L'automatisation des comportements moteurs en relève également.

- Une seconde procède de la mise en place de circuits d'assistance agissant par rétroactions correctrices. C'est le principe de **régulation cybernétique** universellement adopté aussi bien dans la construction des automates artificiels que par les machines biologiques.

- Une troisième fait appel à la **redondance de circuits fonctionnels**. La remarquable analyse théorique de Winograd et Cowan (voir Atlan, 1972) sur la construction de systèmes fiables à partir d'éléments non fiables montre que la redondance des modules opérationnels permet de tolérer des marges d'erreurs importantes dans les processus de traitement des modules pris individuellement. On pourrait ainsi expliquer les étonnantes capacités du système nerveux à compenser de larges destructions de son tissu cérébral (au moins dans les secteurs où la redondance reste élevée).

- On peut aussi imaginer l'existence de véritables fonctions de restauration, de réparation avec des programmes correcteurs d'erreurs de codage, comme il en a été trouvé au niveau des fonctions de réplication du programme génétique.

- On évoquera, enfin, l'ensemble des dispositifs de type homéostatique qui protègent le système contre les perturbations d'origine exogène ou endogène et dont l'importance grandit avec l'accroissement de son autonomie à l'égard de l'environnement.

5.2.5. Ainsi, le système nerveux des vertébrés supérieurs peut-il apparaître comme réalisant une organisation suffisamment **complexe, redondante et fiable** pour acquérir la propriété d'auto-organisation et tirer profit d'un **aléatoire organisationnel**.

Ses capacités auto-organisatrices, toutefois, ne se déploient pas anarchiquement, sans contraintes ni règles. Elles semblent, au contraire,

s'ordonner suivant des directions privilégiées qui nous confrontent au problème de l'identification des critères qui déterminent le choix, parmi les directions possibles que peut prendre le processus organisationnel, de celles qui seront retenues et stabilisées. Ainsi, nous voici parvenu insensiblement au cœur d'un des débats les plus fondamentaux de la biologie contemporaine, celui que posent l'apparent « projet » qui semble guider l'évolution des espèces vivantes et leur auto-construction finalisée qui s'exprime au niveau du développement de tout individu à partir d'une cellule initiale. Autrement dit, le déchiffrement de la logique des organisations vivantes débouche inéluctablement sur le problème des **fonctions téléonomiques**.

5.3. Il ne peut entrer dans nos intentions d'aborder cet important problème des **fonctions téléonomiques** dans le cadre de ce bref exposé. Nous lui avons consacré ailleurs un développement plus complet (J. Paillard, 1977). Nous n'en retiendrons que quelques éclairages particuliers illustrant les ouvertures nouvelles que l'étude de ce domaine peut suggérer pour une meilleure compréhension des mécanismes du contrôle intentionnel de nos actes moteurs en précisant qu'il s'agit là, bien entendu, de pures spéculations théoriques susceptibles toutefois de regrouper de manière cohérente un certain nombre de données expérimentalement fondées.

Qu'il suffise de rappeler le fil directeur d'une telle réflexion : La « vexion » du processus d'organisation selon des orientations privilégiées suppose l'existence de critères selon lesquels une organisation sera jugée bonne ou mauvaise, acceptée ou rejetée. On peut supposer qu'à l'origine du processus organisationnel qui a conduit à la diversification des espèces vivantes c'est le **critère de survie** qui a constitué le moteur essentiel de la sélection évolutive. Il a guidé les choix fondamentaux qui ont conduit à la consolidation des processus de régulation de la machinerie métabolique. Il a sélectionné également les modes de pérennisation de ces acquis à travers les mécanismes de la reproduction invariante. Au départ c'est le milieu qui reste maître des choix; c'est l'environnement qui asservit les formes organiques à ses contraintes en conservant les plus aptes à survivre.

Lorsque l'aptitude à survivre se complète de l'élaboration d'instruments d'auto-correction de ses erreurs par rétroaction de ses propres productions, l'organisation vivante gagne alors en autonomie et en indépendance. Elle gagne en flexibilité adaptative et élargit ses marges de résistance. Elle gagne aussi en fiabilité. Puis elle se dote d'appareils moteurs et de moyens d'action sur l'environnement.

C'est alors que l'organisme vivant peut prendre l'initiative et devenir capable de choisir l'environnement qui lui convient le mieux et ne plus être choisi par lui. Puis bientôt, grâce au développement de son système nerveux et de ses instruments d'action, l'organisme devient capable de transformer ce milieu à sa propre convenance. Il développe parallèlement ses capacités d'anticipation et de prévision. Il développe aussi dans sa machine informationnelle des **fonctions de décision** où vont s'exprimer des capacités de sélection en fonction de certains **critères internes de satisfaction** ou de convenance.

L'étude de ces fonctions de décision se réfère, au niveau des régulations physiologiques de base, aux « valeurs de consigne » aux normes qui assurent

le maintien des grandes constances du milieu intérieur par déclenchement automatique des régulations compensatrices.

Au niveau comportemental aussi, la **sélection des programmes** d'exploration, de consommation, leur déclenchement puis leur arrêt sont basés fondamentalement sur des critères de choix du niveau physiologique.

L'étude des mécanismes neurophysiologiques de la motivation connaît actuellement un développement nouveau important (5). C'est ainsi qu'on reconnaît, aujourd'hui, au système limbique un rôle sélecteur et modulateur des conduites en **référence aux expériences passées**. Il interviendrait aussi dans les processus d'engrammation en affectant l'expérience vécue de sa dimension émotionnelle lui conférant sa qualité d'expérience individuelle et personnelle référée au système de valeurs du sujet (voir fig. 7).

Ainsi, se superpose à la finalité biologique immédiate des comportements fondamentaux référée au système des valeurs physiologiques une finalité d'ordre supérieur dont le référentiel est à rechercher dans une structure dotée

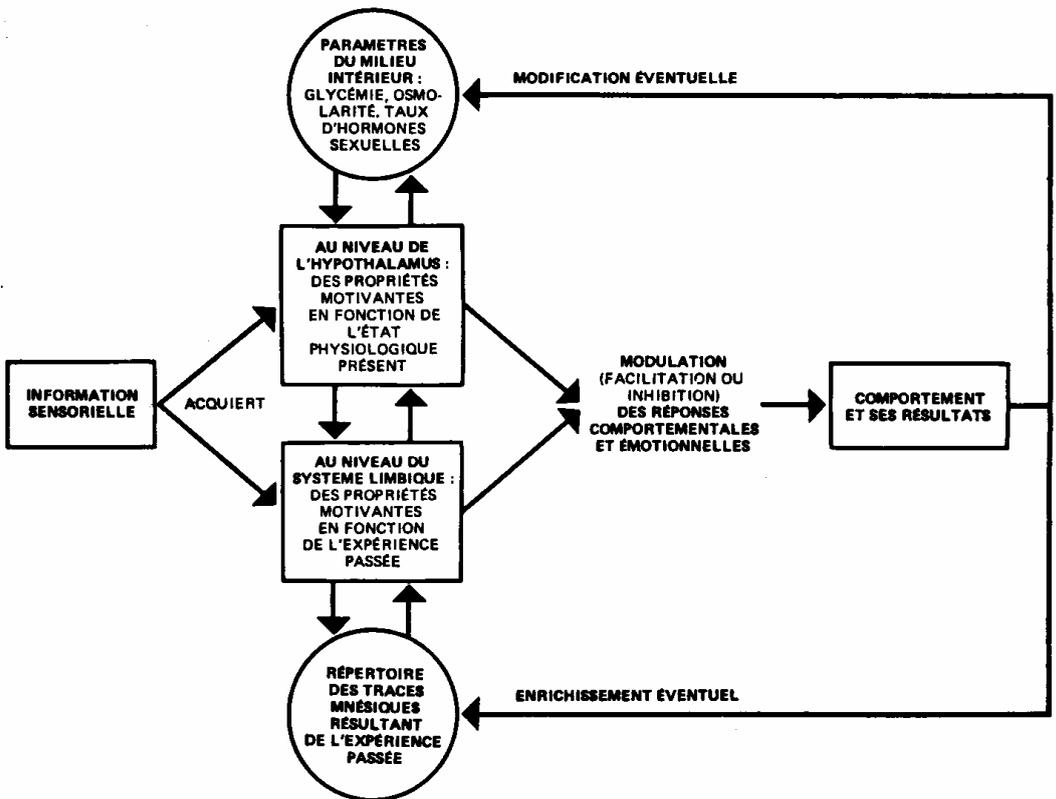


Figure 7. - Schéma d'après Karli (1976) des modalités de traitement des informations sensorielles déclenchant des comportements motivés qui se trouvent confrontées :

- 1) au niveau hypothalamique aux critères de convenance descripteurs de l'état physiologique du système.
- 2) au niveau des structures limbiques aux systèmes de valeurs affectives résultant des expériences antérieures de l'organisme. De cette double référence naîtra la décision de production de telle ou telle activité comportementale dont les effets agissent en retour à la fois pour modifier les paramètres physiologiques sur l'état de l'organisme et pour enrichir l'expérience individuelle.

du pouvoir de jauger les résultats de l'action en fonction d'un système de valeurs cognitives et affectives déterminant ce qui est bénéfique ou non à l'organisation tout entière et capable de guider la sélection des actions présumées efficaces pour répondre aux critères de satisfaction.

Un tel système a été identifié dans son substrat anatomo-fonctionnel. Il s'agit du **système de renforcement** (punition - récompense), découvert par Olds et Milner, dont l'étude physiologique a beaucoup progressé au cours des dix dernières années et qui semble bien constituer une structure-clé de l'organisation biologique. L'organisation des conduites sur la dimension approche - évitement, appétit - aversion par modulation des états de motivation de l'organisme trouve ici son régulateur fondamental.

On doit, dès lors, s'interroger sur la nature du palier supérieur que va constituer le contrôle même de ce régulateur sous-cortical par les structures plus évoluées du néocortex. On reconnaît aux lobes frontaux un rôle privilégié dans la maîtrise des besoins fondamentaux, dans le choix délibéré des motifs de l'action et dans la prévision des conséquences attendues de cette action.

Le système auto-organisateur deviendrait, ici, un système capable de définir et de déterminer lui-même le but qu'il se propose d'atteindre par anticipation des résultats escomptés de son action. Un tel système doit donc disposer du référent nécessaire à l'estimation des changements qui l'éloignent ou le rapprochent du but qu'il s'est assigné. Le système auto-organisateur devient donc à ce stade un **générateur autonome de projets** assorti des critères de « convenance » qui sanctionneront la réussite de leur exécution (9).

Nombreux sont aujourd'hui les modèles de fonctionnement qui prennent en compte l'existence dans le système nerveux d' « images du but », de « plans d'action », de « copies d'efférence » auxquels les « réafférences » nées de l'action sont « comparées » afin de corriger le cours de celle-ci et de l'asservir au but prescrit (10). La notion d'une représentation interne de l'état final escompté qui orienterait l'activité de l'organisme par un processus génératif analogue au processus organisationnel de création d'ordre peut être considérée dans le domaine moteur comme une alternative possible au déclenchement d'un programme moteur rigidement câblé. Elle pourrait constituer un mode opératoire propre à la machine auto-organisatrice alors que la libération du programme précâblé caractériserait le mode de fonctionnement de la machine organisée. Entre ces deux modalités de contrôle du système moteur il y aurait toute la distance qui sépare le mouvement « intentionnel » de l'automatisme, le processus organisationnel créateur d'ordre de sa consolidation dans un circuit stabilisé.

Dans la même perspective enfin on pourrait, sur le plan pédagogique, s'interroger sur les caractères spécifiques de l'apprentissage non dirigé auto-adaptatif comparés à ceux de l'apprentissage instructif. Le premier s'adresse aux capacités autonomes d'organisation ou de réorganisation de la machine organisante. Le second injecte dans la machine organisée des instructions et des critères de convenance ou de satisfaction extérieurs au système.

La problématique de l'activité - passivité dont nous avons parlé nous fournit aujourd'hui d'intéressants modèles expérimentaux pour distinguer les effets organisants ou réorganissants qui résultent de l'activité propre du sujet. Il est clair, par contre, que les procédures de conditionnement pavlovien classique instruisent passivement la machine organisée.

Ces modèles théoriques sont susceptibles de fournir à l'éducateur un cadre nouveau pour l'identification des conditions de sollicitation respectives de la machine auto-organisante et de la machine simplement organisée; la mise en jeu de la première conduisant à une réorganisation adaptative, celle de la seconde à une régulation correctrice; chacune d'elles ayant probablement ses vertus propres et ses indications complémentaires que le processus pédagogique devrait s'efforcer de dégager.

\*  
\* \*

En conclusion :

La distinction entre la part **organisée** et la part **organisante** de la machine biologique nous aide à mieux comprendre ce qui, dans l'organisation du dialogue sensori-moteur qui se poursuit entre un organisme et son environnement, va relever des performances de l'un ou de l'autre de ces deux compartiments fonctionnels et justifier d'une intervention éducative différenciée. Dans le premier cas (machine organisée), l'auto-régulation stabilisante des fonctionnements cybernétiques et l'usage plus ou moins flexible d'un répertoire moteur consolidé et fiable; dans l'autre (machine organisante), la logique conquérante de l'auto-organisation génératrice d'adaptation motrice originale et source d'enrichissement des moyens d'action sur le monde.

Il appartiendra toujours à l'éducateur de rechercher le nécessaire compromis entre les vertus régulatrices, sécurisantes de l'habitude acquise ou de la règle contraignante et les potentialités novatrices de la machine auto-organisante qui s'alimente aux sources de l'imprévisible et du hasard organisationnel. D'un côté la fiabilité de l'automatisme consolidé, de l'autre la souplesse inventive de solutions nouvelles aux problèmes moteurs que rencontre l'organisme; l'une et l'autre demeurant étroitement solidaires; la seconde ne pouvant valablement s'épanouir qu'à l'abri des sécurités que lui fournit la première, laquelle ne peut accroître et même seulement maintenir son propre potentiel que par consolidation des acquis de la seconde.

## BIBLIOGRAPHIE

1. ATLAN H. : L'organisation biologique et la théorie de l'information - Hermann  
- Paris - 1972 - 296 p.
2. AZEMAR G. : La fonction ludique : sources, ressources et portée du jeu dans l'ontogenèse de l'homme - Annales I.N.S. et E.N.S.E.P.S. - 1976 - 89-105.
3. CHANGEUX J.P. : Les communications cellulaires - Sciences et Avenir - 1976  
- 246-265.

4. HELD R. and HEIN A. : Movement - produced stimulation in the development of visually guided behavior - J. comp. Physiol. Psychol. - 1963 - **56** - 872-876.
5. KARLI P. : Neurophysiologie du comportement in Ch. KAYSER - Physiologie tome 2 - Flammarion - Paris - 1976 - 1331-1429.
6. PAILLARD J. : Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace - Cahier de psychologie - 1971 - **14** - 261-316.
7. PAILLARD J. : Tonus, Posture et Mouvement in Ch. KAYSER - Physiologie Tome 2 - Flammarion - Paris - 1976 (a) - 521-728.
8. PAILLARD J. : L'acte moteur comme facteur d'adaptation et de progrès évolutif - in : Sport et progrès de l'homme - Colloque F.S.G.T. - Ed. Français Réunis - 1976 (b) - 71-108.
9. PAILLARD J. : Système nerveux et fonction d'organisation - in Piaget J., Bronkard J.-P., Mounoud P. - La Psychologie - Encyclopédie La Pléiade Gallimard - Paris - 1977 (sous presse).
10. STELMACH G.E. : Motor Control - Academic Press - New-York - 1976  
228 p.