

PSYCHOLOGIE

Sous la direction de Jean Piaget, Pierre Mounoud et Jean-Paul Bronckart

Tirage à part

**SYSTEME NERVEUX ET FONCTION
D'ORGANISATION**

Jacques PAILLARD

ENCYCLOPÉDIE DE LA PLÉIADE

GALLIMARD

PARIS

1986

SYSTÈME NERVEUX ET FONCTION D'ORGANISATION

« Puissent les biologistes et les psychologues collaborer à l'avenir jusqu'à dévoiler ensemble les secrets d'une organisation-organisante, une fois levés ceux de l'organisation déjà organisée » Jean Piaget, 1967

L'étude comparative des êtres vivants montre que l'enrichissement évolutif de leurs capacités d'interaction avec le monde qui les entoure s'accompagne d'un accroissement corrélatif du volume et de la complexité de leur système nerveux. Aussi, poser le problème de l'intégration des données perceptives et de l'organisation des conduites c'est d'abord poser celui de la fonction intégrative et organisatrice du système nerveux; c'est aussi, et plus fondamentalement, se placer sur le terrain d'un des défis les plus redoutables que relève la Biologie contemporaine, celui de comprendre la logique des fonctions d'organisation qui président au développement, au maintien et au fonctionnement des organismes que nous qualifions de vivants.

L'ampleur d'un tel sujet incite certainement davantage à la réflexion qu'à l'inventaire. Au demeurant, si l'on tient compte de l'essor contemporain des Neurosciences, la richesse même de l'inventaire (voir Changeux, 1983) conduirait à s'interroger sur les raisons de la place singulière que prend le système nerveux dans les machines biologiques et sur la nature de la fonction organisatrice qu'il y assume. Comme nous le rappelait François Jacob dans son analyse de la *Logique du vivant* (1970) : « On ne peut plus aujourd'hui dissocier la structure de sa signification, non seulement dans l'organisme mais dans la suite des événements qui ont conduit l'organisme à être ce qu'il est. Tout système vivant est le résultat d'un certain équilibre entre les éléments d'une organisation. »

Mais parler de *fonction d'organisation* suppose tout d'abord définie la notion même d'organisation comme un concept scientifiquement utilisable.

L'ORDRE ET L'ORGANISATION

La notion d'organisation est une notion centrale, essentielle au discours biologique. Elle a joué un rôle fondamental dans la transformation de l'histoire naturelle descriptive de la morphologie des êtres vivants en une biologie explicative des mécanismes de leur fonctionnement. Dès que fut reconnue la relation organe-fonction, la notion d'organisation avec sa dualité structurale et fonctionnelle s'imposait comme descripteur fondamental de la diversité des organisations vivantes. Rien pourtant ne distingue les constituants chimiques élémentaires de la matière «vivante» de ceux de la matière «inanimée». Il est aujourd'hui reconnu qu'il n'y a pas à proprement parler de « matière vivante » mais seulement des « systèmes vivants », des « êtres organisés » dont la seule spécificité, la seule unité reconnue sont du domaine de « l'organisation » des éléments matériels qui les composent. A l'ordre qui règne dans la matière inanimée, celui que nous révèlent les instruments de la Physique, se superpose une organisation qui définit et spécifie le monde du vivant.

Comprendre « l'organisation » et sa logique situe donc bien l'objectif premier, disons le « projet » essentiel de la démarche biologique. Curieusement cependant, et bien que guidée par ce projet, la construction progressive des connaissances biologiques n'a utilisé le concept que de manière assez vague et encore largement intuitive. On lui reconnaît en effet une incontestable valeur descriptive; la notion d'organisation impose, en particulier dans l'étude des objets biologiques, la description de niveaux d'organisation avec l'idée sous-jacente, tout aussi obscure, de complexité. On peut, en fait, dans une première analyse du contenu de la notion d'organisation en distinguer trois aspects :

L'ORGANISATION COMME STRUCTURE

L'organisation comme *structure* est descriptive de l'état d'ordre qui régit la distribution spatiale des éléments matériels qui la constituent. Suivant les niveaux, on décrira une morphologie, une anatomie, une histologie, une cytologie, etc., et on définira les supports structuraux des comportements de sous-structures qui composent l'architecture de la structure totale. Un premier paradoxe surgit ici : celui de la stabilité des états de la structure matérielle décrite. Elle introduit la notion d'échelle dimensionnelle d'espace avec la distinction, aujourd'hui familière en physique, entre états macroscopiques et états microscopiques. Toute instabilité structurale traduit un changement d'état de la structure. Toute transition d'état traduit une activité de la structure. Une activité de la microstructure n'est pas incompatible avec la stabilité de l'état de la macrostructure et souvent même la conditionne. On voit se profiler ici la notion de palier d'organisation avec le changement des échelles d'espace. Le palier définit une discontinuité de niveau, avec des changements de propriétés caractéristiques qui imposent des changements d'objet, de méthodes ou de conditions d'observation.

L'ORGANISATION COMME PROCESSUS

L'organisation comme *processus* ne se définit plus par la distribution spatiale des condensations d'énergie-matière qui constituent la structure observée mais par l'ordre des activités dont elles sont le siège : c'est-à-dire la distribution dans le temps dans l'espace des changements d'états des éléments du système et leurs interdépendances éventuelles. Dans une machine biologique ces activités internes (dont l'étude fait l'objet de la Physiologie) vont s'ordonner dans un fonctionnement.

Dans ce sens on parlera d'une *organisation fonctionnelle*.

Soulignons, ici, une difficulté sémantique très réelle et souvent source de confusion dans le discours biologique : celle de la nécessaire distinction entre le *fonctionnement comme processus* et la *fonction comme produit final* du processus ; dans son souci d'évacuer la

notion de « finalité » le physiologiste a toujours été enclin à ne vouloir considérer que les chaînes causales du processus comme seules accessibles à une analyse objective, sans vouloir poser clairement la question de la *signification* du résultat de l'action qui s'exprime dans la *fonction*.

Cette dernière notion va revêtir une importance capitale lorsqu'il sera reconnu que l'unité des êtres vivants réside avant tout dans l'identité des produits de leur fonctionnement et non dans l'homomorphie des structures qui sous-tendent ce fonctionnement. La diversité morphologique et structurale est compatible chez les êtres organisés avec une unité de fonctions. Ainsi, les fonctions fondamentales de nutrition, de locomotion, de reproduction sont identifiables chez tous les êtres vivants, mais peuvent être accomplies par la voie d'instruments organiques très diversifiés suivant les espèces. Ce qui nous amène à introduire une troisième acception du terme d'organisation.

L'ORGANISATION COMME FONCTION

Nous touchons ici à une notion centrale pour notre propos dès lors que nous nous proposons d'étudier la *fonction d'organisation* du système nerveux. Parler de fonction, nous venons de le voir, suppose l'identification d'une signification, d'une « finalité fonctionnelle ». De manière non équivoque on peut dire qu'une fonction d'organisation se traduit par, un engendrement d'ordre, qu'elle a pour expression une transformation du système sur lequel elle exerce son action en un nouvel ordre structural ou fonctionnel qui définit sa nouvelle organisation.

On peut légitimement considérer le processus producteur de cette fonction comme un fonctionnement organisateur, comme un enchaînement d'activités organisatrices. Ces dernières ne peuvent être comprises et analysées qu'en référence à leur produit final et au critère de convenance qui le sanctionne. Le même raisonnement récursif inciterait à rechercher le support de ce processus organisateur et à lui accorder le statut d'un générateur d'ordre en lui conférant par là même le statut d'une organisation structuro-fonctionnelle dotée du pouvoir d'organisation, autrement dit celui d'une « organisation

organisante » au sens où l'entendait Piaget (1967).

A n'en pas douter, le génome comme structure organisée constitue dans les machines vivantes le prototype d'un générateur d'organisation. En cela, les remarquables progrès de la biologie moléculaire pourraient autoriser l'espoir d'une compréhension réductionniste de la fonction d'organisation. Mais, à supposer totalement déchiffré l'état structural de ce générateur et largement élucidée la logique de son fonctionnement, c'est finalement le problème de l'intelligibilité du produit de ce fonctionnement qui se trouve posé, autrement dit celui de son statut « téléonomique ». On ne s'étonnera pas que, s'agissant de la bactérie qui a servi de modèle d'analyse à la Biologie moléculaire, on puisse se satisfaire de l'identification d'une fonction téléonomique simple la reproduction invariante de la structure. C'est ainsi que *Escherichia coli* puisqu'il faut bien désigner cette vedette bactérienne par son nom, qui constitue ce que Jacob (1970) a défini humoristiquement comme le « minimum vital », c'est-à-dire l'unité d'organisation vivante la plus élémentaire, aurait pour seule... aspiration ? intention ? finalité ? désir ? - François Jacob a dû hésiter sur le terme mais il choisira de dire poétiquement « pour seul rêve » - de se reproduire.

A considérer maintenant le système nerveux, on s'accorde à le voir aujourd'hui comme un « appareil téléonomique » d'ordre supérieur. Son apparition dans les machines biologiques comme résultat de leur complexification évolutive constitue un fait nouveau très remarquable. Son fonctionnement comme générateur d'ordre s'exprime sur un support structural très différent de celui qui assure le fonctionnement constructeur du génome. L'espoir de découvrir ne serait-ce qu'un isomorphisme fonctionnel entre les deux structures téléonomiques reste probablement limité si l'on mesure déjà l'extrême versatilité des fonctions téléonomiques dont le système nerveux va devenir l'instrument au niveau individuel au regard de la relative rigidité d'expression des finalités génétiques chez un individu donné. Suivons cependant ce fil conducteur et, partant du « minimum vital » qu'est la cellule comme *unité d'organisation élémentaire autonome*, tentons de

décrire ce qui caractérise les organisations complexes constitutives des édifices vivants pluricellulaires.

LA HIÉRARCHIE D'EMBOÎTEMENT DES UNITÉS D'ORGANISATION

NIVEAUX D'INTÉGRATION

Plus la Biologie progresse dans l'étude des organisations vivantes, de leur comportement, de leur évolution, et plus s'impose la prise en considération de discontinuités, de paliers fonctionnels qui différencient des niveaux d'intégration. De la cellule à la collectivité des individus qui constituent l'espèce, la Biologie circonscrit un emboîtement de systèmes de « complexité » croissante mais qui possèdent tous en propre une propriété intégrative qui définit leur *individualité* et leur *unité fonctionnelle*.

Chaque niveau d'organisation de ces unités systématiques représente un seuil où brusquement, du fait des échelles d'espace ou des durées d'évolution des processus fonctionnels, les objets scientifiquement observables, les processus discernables ou mesurables changent qui appellent pour leur étude des méthodes qui leur sont propres. La transformation des espèces à travers la dynamique de l'évolution, les comportements sociaux à travers la dynamique des relations interindividuelles, le comportement des organismes engendrés par la dynamique du fonctionnement des organes, la fonction des organes comme produit des interactions cellulaires, les fonctions cellulaires comme résultat des interactions moléculaires... constituent autant de descripteurs des activités biologiques caractéristiques d'un niveau d'observation. Les difficultés d'articulation de ces niveaux deux à deux en vue d'expliquer les productions spécifiques d'un certain niveau par les fonctionnements des niveaux sous-jacents vont croissant au fur et à mesure que l'on monte dans l'échelle de l'organisation.

La logique de construction de ces organisations, comme la logique de leur hiérarchie d'emboîtement dans l'organisme achevé, imposent la compréhension du principe d'ordre

que reflète l'existence d'unités d'intégration emboîtées et de phénomènes singuliers qui se situent au niveau de la discontinuité qui les sépare (voir Atlan 1983).

TYPES DE DESCRIPTION

Toute unité d'organisation vivante va se définir comme un ensemble d'éléments interagissants. Ces éléments constituent les sous-structures de la structure totale. C'est de l'interaction entre les sous-structures que va résulter le fonctionnement de l'unité. Le produit de ce fonctionnement s'exprime dans une action intégrée de l'unité (sa fonction) dirigée sur les éléments de la superstructure dont elle fait partie. La cellule, les tissus, les organes, l'individu intégré, les groupes d'individus, les sociétés, etc., constituent les types de structures emboîtées caractéristiques des organisations vivantes (les *intégrons* de F. Jacob : les *unités systémiques* de P. Weiss ; les *orgs* de Gérard, les *holons* de Köstler ; etc.).

Comme unité organisationnelle chaque système peut se décrire par l'arrangement de sa structure, par la dynamique de son fonctionnement, par la finalité de sa fonction et par son caractère intégratif (voir figure 1).

LA STRUCTURE

Elle comprend fondamentalement:

- une *structure d'interface* qui délimite les frontières d'un espace interne au système et qui le sépare d'un espace externe ou environnement du système considéré. Cette interface est le lieu des échanges énergétiques et/ou informationnels entre le système et l'environnement que lui constitue le supersystème où il est inséré ;
- des *éléments composants* ou sous-systèmes du système considéré ;
- des *structures de liaison* entre éléments composants, ou structures de connectivité. Ces liaisons sont le support des processus d'interactions énergétiques et/ou informationnels entre les éléments du système.

Le fonctionnement de l'intégron se décrit en termes de transition d'état, d'activité des divers éléments de la structure. La répartition spatio-temporelle de ces activités traduit l'organisation fonctionnelle interne à l'intégron.

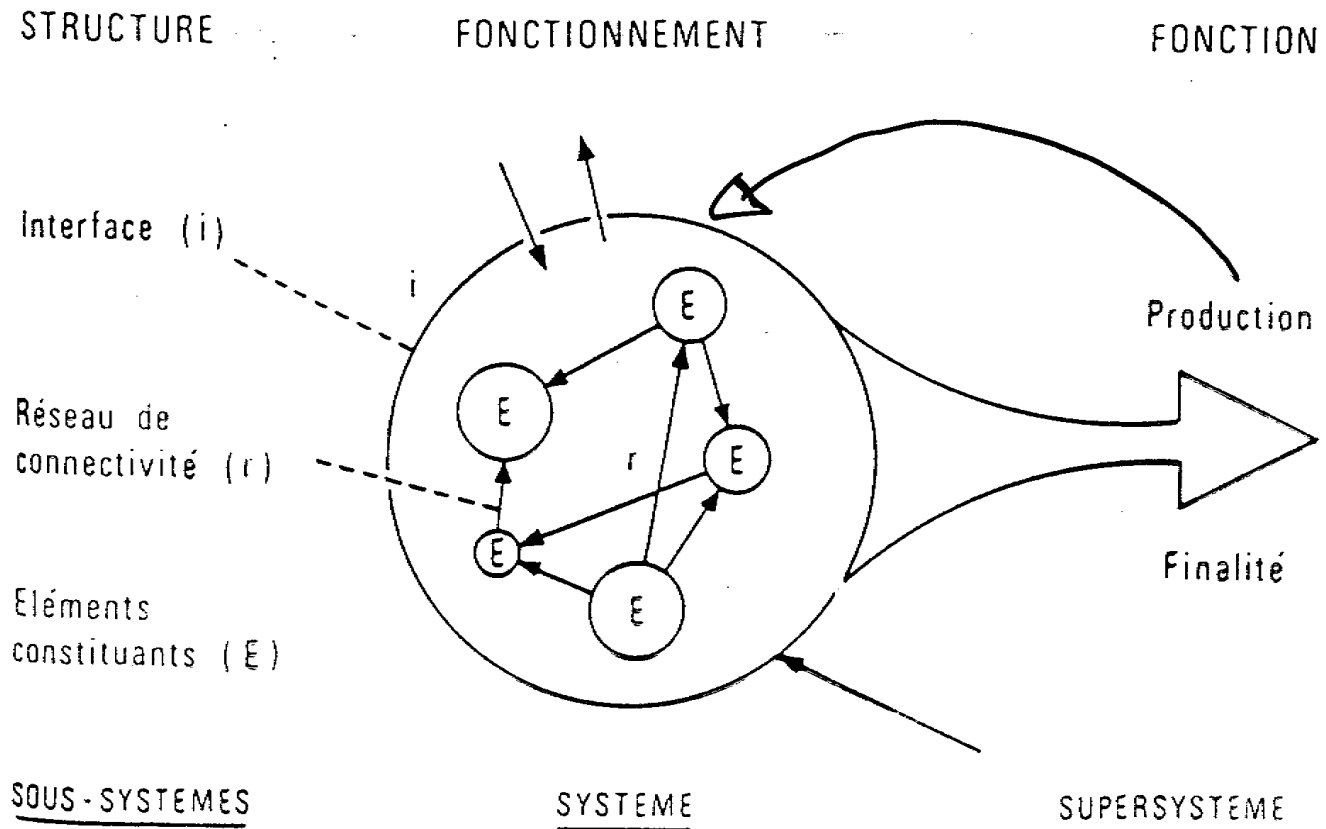


Fig. 1 - SCHÉMA DE L'INTEGRON.

L'organisation structurale comprend : l'interface (i), les éléments constitutants (E) (ou sous-systèmes) et le réseau de connectivité (r) qui associe les sous-systèmes entre eux. Le *fonctionnement* du système résulte de la dynamique des processus d'interactions énergétiques et/ou informationnelles entre éléments constitutants. L'interface est le lieu des *échanges* énergétiques et/ou informationnels entre l'intégron et son environnement. La *fonction* est le produit intégré du processus de fonctionnement, La *signification fonctionnelle* (finalité) de cette production s'exprime dans le supersystème dont l'intégron est un élément composant,

(D'après J. Paillard, J. Psychol. Norm. Pathol., 1976, n° 1. 33-47.)

LA FONCTION

La fonction de l'intégron s'exprime par une production énergétique et/ou informationnelle dans son environnement c'est-à-dire sur les éléments du supersystème dont il fait partie. La signification, donc la finalité de cette action, ne devient intelligible que référée au fonctionnement de ce supersystème. Cette action engendre de fait un processus d'interaction avec les éléments composant le supersystème considéré. Il est donc important de saisir que les productions fonctionnelles du sous-système d'un certain niveau deviennent le support des activités de fonctionnement du système de niveau immédiatement supérieur. Il en résulte également que le concept de « signification », que l'observateur tente d'utiliser pour caractériser ce produit fonctionnel du système, ne trouvera sa justification réelle qu'en référence aux « valeurs » normatives propres au supersystème autonome dont il est l'élément (Varela, 1979).

A l'échelon qui nous préoccupe ici, celui de l'intégron-organisme, le *comportement*, comme *produit fonctionnel* de l'activité de l'organisme intégré, peut être décrit comme le résultat de la mise en jeu du *fonctionnement* des éléments interconnectés par le système nerveux considéré comme sous-structure de l'intégron-organisme. La signification fonctionnelle de ce comportement ne peut être trouvée que dans la *dynamique du couplage organisme-environnement* spécifique de ce niveau d'organisation.

L'INTÉGRATION

La propriété intégrative de l'unité d'organisation va s'exprimer au niveau de la dépendance dans laquelle chaque sous-structure qui la compose se trouve vis-à-vis de la structure d'ensemble et de son fonctionnement intégré, Nous touchons ici un point capital pour notre propos. L'intégration des machines biologiques ne résulte pas de la simple additivité des propriétés de leurs parties constituantes. Elle implique aussi, et peut-être principalement, l'émergence (au moins à certains niveaux d'emboîtement de leur

organisation systémique) de propriété nouvelles et originales comme résultat du fonctionnement global de la totalité organisée que constitue l'unité systémique du niveau d'observation considéré. Le système cellulaire, le système organique, le système social constituent des exemples d'unité d'organisation autonome et individualisée présentant ces propriétés fonctionnelles émergentes qu'il importe maintenant de mieux spécifier quant à leur nature et quant à l'organisation des processus qui en sous-tendent l'expression.

LES DÉTERMINANTS DE LA SOLIDARISATION SYSTÉMIQUE

Il est trivial de rappeler que ce qui va définir l'organisation c'est l'identification d'une certaine ordonnance dans l'arrangement des relations qui unissent les éléments constituants et qui assurent leur interdépendance. Ces solidarités relationnelles sont, bien entendu, à rechercher aux trois niveaux d'expression de l'organisation considérée soit comme état, soit comme processus, soit comme production fonctionnelle.

LES SOLIDARITÉS STRUCTURALES

Cette interdépendance va tout d'abord s'exprimer dans l'organisation structurale par les *solidarités mécaniques* (surfaces limitantes, matériaux conjonctifs, squelette rigide, structures de connectivité diverses) qui consolident l'échafaudage des architectures organiques. On sait que ces architectures sont très directement l'expression d'un ordre imposé à une morphogenèse génétiquement programmée.

LES SOLIDARITÉS FONCTIONNELLES

Cette interdépendance s'exprime aussi dans l'organisation fonctionnelle, en premier lieu grâce à la présence d'un milieu intérieur liquide où baigne l'ensemble de la collectivité cellulaire. Ce milieu réalise une *solidarité humorale* en assurant, par ses

canaux de distribution spécialisés, l'irrigation de toute la communauté et son approvisionnement en matériaux énergétiques nécessaires à son entretien métabolique en même temps que l'évacuation des déchets de ce métabolisme. Ces mêmes milieux liquides vont transporter des signaux chimiques à distance. Ces derniers vont constituer une structure relationnelle spécialisée d'un type nouveau dont nous pouvons suivre l'évolution à divers niveaux :

AU NIVEAU CELLULAIRE

A ce niveau, nous savons que la machinerie chimique du métabolisme suppose un grand nombre d'interactions précises entre molécules par des voies divergentes ou convergentes et cycliques suivant la logique d'une régulation cybernétique. L'ordonnance des activités de la machine chimique se trouve assurée par des protéines dites « régulatrices » qui jouent un rôle dans la détection et la reconnaissance de signaux. Ces protéines n'interviennent pas directement comme source d'énergie chimique mais simplement comme déclencheur de certaines réactions spécifiques. Leurs propriétés reposent, en dernière analyse, sur leurs caractéristiques dites « stéréospécifiques », c'est-à-dire sur leur capacité à reconnaître d'autres molécules d'après leur forme. On a pu parler à leur propos d'une propriété discriminative assimilable à une fonction « cognitive » du niveau microscopique. En d'autres termes, l'intégration du niveau d'organisation cellulaire dépend d'une structure relationnelle qui solidarise les éléments moléculaires qui la composent. Cette structure préfigure des solidarités qualifiées *d'informationnelles* que nous retrouverons aux niveaux supérieurs d'organisation.

AU NIVEAU DE L'ORGANISME

A ce niveau, en effet, l'intégration par la voie de systèmes hormonaux repose sur un principe analogue. Des structures spécialisées (glandes endocrines) émettent des signaux et la spécificité des structures de réception orientent les interactions et permettent la mise en

place de régulations cybernétiques très élaborées. Mais c'est la différenciation d'un tissu nerveux spécialisé dans la transmission d'actions à distance selon des voies spécifiées structurellement qui aboutit à la mise en place d'une structure de connectivité interne beaucoup plus élaborée. Comme on le sait, l'activité propre de ces structures relationnelles hormonales ou nerveuses reste peu coûteuse du point de vue énergétique comparativement aux exigences métaboliques de l'entretien thermodynamique des structures organiques. Le système nerveux, d'autre part, comme agent de l'intégration organique devient aussi l'agent des interactions informationnelles entre l'organisme et son environnement, Comme système d'assimilation et de traitement d'information, et par suite comme système générateur d'informations, il va constituer une structure entièrement originale possédant les propriétés d'un producteur de *solidarités dites computationnelles* qui viennent amplifier les pouvoirs de sa fonction organisatrice.

AU NIVEAU DES COLLECTIVITÉS D'ORGANISMES

A ce niveau, ce sont également les interactions informationnelles qui vont devenir le support des échanges régulateurs et intégrateurs des activités du système social. Les individus de la communauté communiquent entre eux. On sait, par exemple, le rôle privilégié tenu par les informations chimiques dans les signaux de reconnaissance qui vont permettre l'identification des partenaires sexuels. Mais la différenciation de systèmes de reconnaissance variés et très élaborés sous forme de mécanorécepteurs, de photorécepteurs, de chémorécepteurs, vient considérablement enrichir les échanges informationnels entre l'organisme et les éléments matériels du supersystème où il s'intègre. L'émission de signaux spécifiques, sous forme de sons ou même de postures, d'attitudes, de mouvements, vient aussi accroître les possibilités d'interactions entre organismes en préfigurant les formes élaborées du langage humain. C'est encore le système nerveux qui devient ici l'instrument principal du perfectionnement de tels échanges conversationnels et qui va, en particulier

chez l'Homme, bénéficiant des codages symboliques du langage communautaire pour amplifier la puissance de l'appareil cérébral dans sa fonction d'organisation des modèles cognitifs internes qu'il se construit du monde.

LA PRODUCTION D'IDENTITÉ

Mais il est un troisième volet d'expression des solidarités intra-organiques, volet souvent négligé par les approches biologiques traditionnelles. Il concerne le produit proprement intégratif du fonctionnement de l'organisation biologique dont émerge son identité comme totalité autonome et singulière (Varela, 1979).

Alors que nous n'avons aucune réticence à évoquer l'existence d'un « esprit d'équipe » ou d'un « esprit de corps » pour désigner, au niveau du fonctionnement des communautés sociales, ce principe unificateur qui rassemble et coordonne les énergies individuelles au service d'objectifs communautaires, la biologie s'est longtemps refusée à considérer la présence d'un tel principe de fonctionnement unificateur au sein des organismes. Historiquement, toutefois, on peut reconnaître deux ouvertures conceptuelles importantes qui ont contribué à poser le problème.

La première concerne la formulation du principe de constance du milieu intérieur par Claude Bernard et son expression en termes de régulation homéostatique par Cannon pour voir la pensée biologique analytique et expérimentale déboucher sur un concept englobant et totalisant. L'autonomie régulatrice du maintien de la constance de ce milieu interne apparut alors comme la condition « de la vie libre et indépendante » de la communauté cellulaire organique. Ainsi l'organisation vivante conçue comme autonome et autoconservatrice, fonctionnant par elle-même et pour elle-même allait conduire Claude Bernard à ce constat scientifiquement assez paradoxal et dont la portée théorique a été insuffisamment appréciée « l'être vivant est *un* organisme et *une* individualité ».

Mais c'est en fait l'immunologie qui désignera chez l'être vivant une capacité d'identifier ce qui est étranger à sa propre substance, autrement dit de discriminer

autoréférentiellement le « soi » du « non-soi », donc de conférer une identité et une individualité à la matière organique.

On se trouve, dès lors, confronté à l'hypothèse d'un engendrement, par le fonctionnement intégratif du système nerveux, d'une capacité d'autoproduction d'une identité psycho-organique et amené à la considérer comme un facteur additionnel de la solidarité fonctionnelle du système intégré. La prise en considération d'une telle instance régulatrice s'impose désormais à l'explication biologique des fonctions d'organisation. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point.

LES NIVEAUX DE DESCRIPTION DE LA FONCTION ORGANISATRICE

Ainsi le constat du caractère plurifactoriel des déterminants de la solidarisation systémique nous amène à distinguer clairement divers niveaux de description de la fonction organisatrice :

a) celui du processus organisant lui-même qui se traduit dans les transitions d'états énergétiques du système. La légitimité d'une distinction entre grandeurs thermodynamiques associées aux interactions proprement énergétiques et grandeurs qualifiées d'informationnelles peut ici être discutée,

b) celui des supports de connectivité sur lesquels s'expriment ces processus d'interaction avec le problème : de la stabilité ou de l'instabilité structurelle de ces supports,

c) celui de la récursivité des produits du fonctionnement organisateur sur le processus lui-même, soit directement par simple régulation de sa dynamique fonctionnelle sans modification de sa structure de connectivité (autorégulation), soit indirectement par modification de la connectivité structurale interne au système (auto-organisation).

Nous n'aborderons pas ici les problèmes théoriques soulevés par l'élaboration formelle des théories de l'information avec tout ce que la définition de l'information comme grandeur mesurable contient d'équivoque et de paradoxal pour notre sens commun en évacuant la notion de signification. Retenons simplement que *l'information* « réduite » à la mesure d'une incertitude probabiliste accède désormais à la légalité physique depuis

qu'ont été établis les liens étroits qui unissent les quantités d'informations aux grandeurs physiques d'entropie dans le cadre des lois universelles de la thermodynamique qui régissent les rapports de la matière et de l'énergie (voir Atlan, 1972). Il nous suffira de dire que le pragmatisme de la pensée biologique a, là encore, et notamment s'agissant du système nerveux, adopté le vocabulaire descriptif des théories de l'information (messages, code, canal, émetteur, récepteur, programme...), comme elle avait adopté le concept d'organisation, sans réellement prendre en compte le caractère encore largement métaphorique de telles notions lorsqu'on les applique à l'étude des organisations vivantes et du système nerveux en particulier (Fessard, 1968). La période actuelle est riche de courants divers qui marquent une vigoureuse poussée de la biologie théorique à la recherche de nouvelles issues thermodynamique des phénomènes irréversibles et principe d'ordre par fluctuation (Prigogine, 1972), homéokinétique et théorie physique du fonctionnement cérébral (Iberall 1972) ; elle est aussi marquée par le souci soit de dégager de nouveaux outils de formalisation et de modélisation de la complexité des objets biologiques (Thom, 1972; Varela, 1979), soit encore d'aspirer à une nouvelle révolution paradigmatique et à la formulation axiomatique de nouvelles règles de la pensée logique (Morin, 1980 ; Castoriadis, 1978; Le Moigne, 1980, 1983, etc.).

Sans méconnaître l'importance de ces nouveaux courants théoriques, force est de constater qu'ils n'ont pas encore suffisamment pénétré la pensée biologique au point de susciter l'abandon des modèles issus des théories de l'information, modèles qui orientent encore aujourd'hui de manière dominante les travaux des expérimentalistes. Aussi resterons-nous dans le cadre de tels modèles qui décrivent les systèmes vivants comme systèmes « ouverts » et comme sièges de processus stationnaires de non-équilibre entretenus par le double flux d'énergie et d'information qui les traverse, en assumant l'ambiguïté qui s'attache encore au statut réel de l'information dans les machines biologiques.

Cette réserve étant faite, nous envisagerons successivement les manifestations du fonctionnement organisateur du système nerveux qui s'expriment d'abord dans la *fonction d'autorégulation* des unités rigidement câblées du système, puis

dans un *fonctionnement auto-organisateur* qui repose sur la plasticité connexionnelle des circuits nerveux. Nous envisagerons, enfin, le problème de l'existence d'un pouvoir organisateur de niveau supérieur qui confère aux systèmes nerveux les plus évolués des fonctions opératoires d'un type entièrement nouveau. Celles-ci s'expriment par le jeu d'un *appareil cognitif* capable d'élaborer une représentation interne de son environnement et une connaissance de lui-même lui permettant d'engendrer de manière autonome les projets qui guideront ses activités.

LES LOGIQUES CÂBLÉES ET L' AUTORÉGULATION CYBERNÉTIQUE

On sait l'importance prise dans les sciences contemporaines par les modèles cybernétiques de contrôle et de régulation. Il ne peut être question de faire ici l'inventaire de leurs portées explicatives au plan de la régulation biologique. On retiendra cependant, s'agissant de l'évolution des idées, l'importante rupture épistémologique qu'a introduite en biologie la remise en cause des principes de causalité linéaire. Ce sont ces principes qui conduisirent, par exemple, à faire du réflexe l'unité élémentaire d'organisation du système nerveux (Sherrington, 1906). En introduisant, avec le succès que l'on sait, la causalité circulaire de la rétroaction en feed-back, la cybernétique identifiait la *boucle autorégulatrice* comme unité fonctionnelle et base de toute l'organisation des systèmes vivants. Dès lors, la pensée biologique pouvait s'évader des conceptions mécanistes étroites qui retardaient sa progression en apportant une réponse décisive à l'irritant problème de la finalité que d'aucuns avaient jugé définitivement insoluble.

LA LOGIQUE DU CONTRÔLE RÉTROACTIF

La logique du contrôle rétroactif de l'action permet, en effet, d'asservir le fonctionnement du mécanisme à un signal de référence, une valeur de consigne, assurant

automatiquement la réduction de l'écart existant entre la réponse actuelle du système et le but final que lui assigne son signal de commande, autrement dit sa valeur de consigne. Le triomphe de l'automatisme et de la robotique dans la conception des machines modernes n'est pas contestable. Il démontre qu'un mécanisme constitué de circuits stables ne conduit pas à la stéréotypie rigide de son fonctionnement mais peut, grâce à la logique de son organisation interne, manifester un comportement adaptatif et finalisé. En cela, celui-ci simule certains aspects du comportement d'une machine biologique et justifie la recherche d'une logique d'organisation similaire dans la circuiterie nerveuse câblée. La neurophysiologie a cependant éprouvé quelques difficultés à déchiffrer cette structure d'organisation dans un câblage nerveux complexe et d'accès expérimental difficile. Le formalisme de la cybernétique des bio-systèmes, s'il a fourni, en général, un vocabulaire de description et un cadre d'interprétation théorique cohérents, n'a cependant pas confirmé, en dépit d'indéniables succès locaux, les espoirs que l'on pouvait mettre dans une ingénierie biologique qui s'appuierait sur des modèles mathématisables et prédictifs. Deux obstacles majeurs peuvent être identifiés : la non-linéarité fondamentale des systèmes biologiques qui pose des problèmes difficiles à formaliser à l'aide des outils mathématiques qui ont fait le succès de la physique ; la richesse et la complexité, insoupçonnées jusqu'à une période récente, des processus de neurotransmission (Agid, 1983).

LES PROGRAMMES MOTEURS

Du point de vue conceptuel, toutefois, on retiendra le dégagement de la notion de programmes moteurs qui est venue s'ajouter aux schémas classiques de la réflexologie sherringtonienne. Inscrits dans la connectivité rigide du système nerveux ils constituent de véritables modules de commande d'un ensemble coordonné de muscles préadaptés à l'exécution d'actes ou de composantes d'actes biologiquement significatifs. On évoque, ici, la notion de générateur de programme, de neurones ou de réseaux de commande, dont la simple stimulation électrique appliquée en des points nodaux du réseau suffit à libérer le

déroulement coordonné d'un programme fonctionnel complet et biologiquement significatif (voir Stein, 1978). 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, à l'orientation posturale ont leurs points nodaux identifiés dans le tronc cérébral, notamment dans les structures mésencéphaliques. Ils constituent, de fait, le répertoire d'actions préadaptées qui permet à l'organisme d'affronter efficacement les contraintes de son environnement et d'y assurer sa survie. Le câblage de ces modules est, au moins pour certains d'entre eux, aujourd'hui connu dans le détail de la microcircuiterie qui relie les neurones composants. Lorsqu'on supprime les circuits de rétroaction, autrement dit les informations réflexogènes (par section des racines dorsales de la moelle), on constate que le programme peut encore être déclenché avec toutes ses caractéristiques stéréotypées mais sans présenter la souplesse d'adaptation des activités naturelles. Le plan de câblage de la circuiterie réflexe répond en fait aux exigences d'une assistance à l'exécution d'un 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 des éléments de boucle d'assistance à l'exécution des programmes internes câblés (Paillard, 1982 a). 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.

En un sens, la marge de flexibilité qu'assure l'autorégulation de ces programmes moteurs peut être assimilée aux capacités « assimilatrices » du « schéma sensorimoteur » piagétien.

On peut ajouter qu'il existe complémentirement un mécanisme d'« accommodation » de ces mêmes programmes qui se traduit par une modification de l'efficacité de franchissement des barrières synaptiques par les signaux circulant dans le réseau de connectivité. Cette modification résulte de la mise en œuvre de processus automatiques de changement de gain de certaines transmissions synaptiques (voir J. Paillard, 1982 a). Elle traduit l'existence d'une véritable accommodation anticipatrice durable du « schème sensorimoteur » On parlera alors de régulation en « feedforward » pour l'opposer à l'autorégulation directe en *feed-back* de l'action en cours d'exécution.

LES UNITÉS MODULAIRES

La neurophysiologie contemporaine est activement engagée dans l'identification et le décryptage de ces unités modulaires qui constituent la part génétiquement organisée de la machinerie nerveuse.

La coordination des actions requises pour l'expression correcte des programmes finalisés va résulter de l'emboîtement hiérarchisé de « sous-routines » élémentaires. Les relations d'interdépendance qui les solidarisent dans une unité systémique organisée (Weiss, 1961) sont aujourd'hui perçues davantage comme résultant d'un couplage fonctionnel entre structures modulaires réparties aux divers étages du névraxe plutôt que reflétant la conception jacksonnienne d'une stratification horizontale des niveaux fonctionnels. On oppose ici un mode *hiérarchique* d'interactions à une organisation de type *hiérarchique*. Il s'agit, en fait, moins d'une opposition que d'une complémentarité de ces deux principes organisationnels qui sont conjointement mis en œuvre dans l'élaboration de la réponse comportementale. 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. L'analyse de ces boucles sensorimotrices révèle, en fait, une distribution verticale de canaux sensorimoteurs indépendants dont chacun est caractérisé par le type d'information sensorielle qu'il est susceptible de traiter et par la contribution spécifique qu'il apporte à l'organisation des activités motrices qu'il contrôle.

C'est du fonctionnement parallèle et simultané de ces divers canaux sensorimoteurs que résulterait l'organisation d'un mouvement finalisé (voir J. Paillard, 1980 et Goodale, 1982).

Une même organisation modulaire est actuellement retrouvée au niveau des structures néocorticales (Szentagothai, 1975). Le développement récent de nouvelles techniques performantes de marquage et de traçage de la circuiterie interneuronale révèle l'extrême précision du plan de câblage de l'organisation cérébrale. Le cerveau n'apparaît plus comme cette masse d'éléments cellulaires inextricablement enchevêtrés qui a longtemps imposé le recours à des modèles de fonctionnement de type « stochastique » postulant une distribution aléatoire des connexions interneuronales. Le cortex cérébral apparaît, au premier stade de son développement, comme un assemblage de colonnes verticales élémentaires, toutes semblables, contenant un nombre défini de neurones (110) provenant d'un même clone. Ces neurones migrent à partir de la lame primitive le long de filaments cellulaires gliaux parallèles, assurant leur distribution en microcolonnes répétitives de 30 microns de diamètre (Rakic, 1972). (voir Fig. 2)

Cette organisation primitive se retrouve dans les cerveaux de tous les mammifères, cerveaux qui ne différeraient donc entre eux que par le nombre des microcolonnes qui les composent. Ces microcolonnes se groupent en faisceaux composant des colonnes de 300 microns de diamètre en moyenne que l'on identifie maintenant dans toutes les aires corticales sensorielles, motrices ou associatives (Mountcastle, 1978). On reste très frappé de l'invariance de ces chiffres et, si la hauteur des colonnes peut varier d'une espèce à l'autre d'un facteur 3 environ en rapport avec des variations de densité des ramifications dendritiques et du nombre de cellules gliales, le nombre des neurones et leur différenciation en classes de cellules morphologiquement définies restent stables. Ce qui impose la notion d'un module de base unique quant à l'organisation de ses connexions intrinsèques et dont la fonction opératoire spécifique va essentiellement dépendre de la configuration des afférences qu'il reçoit.

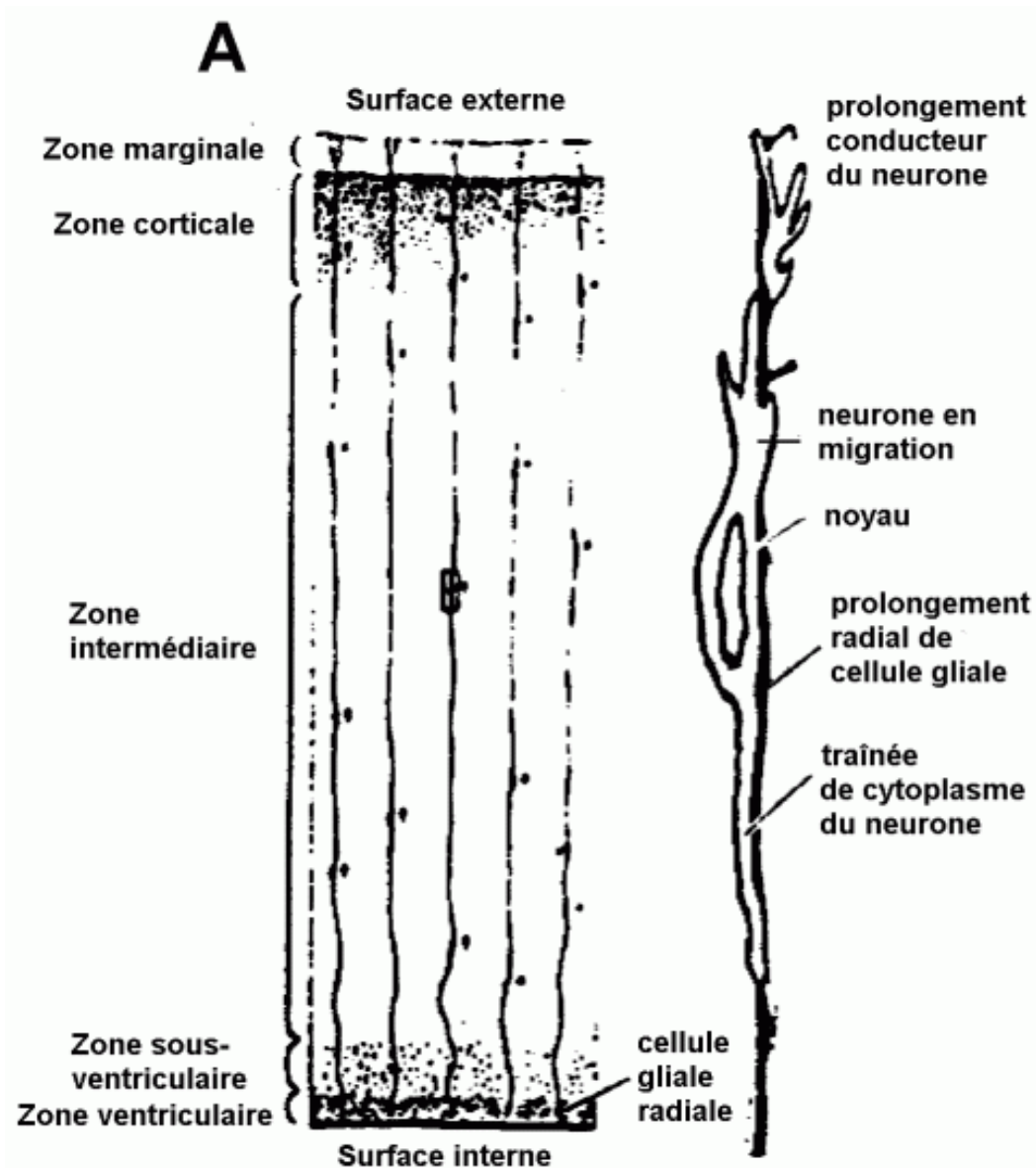
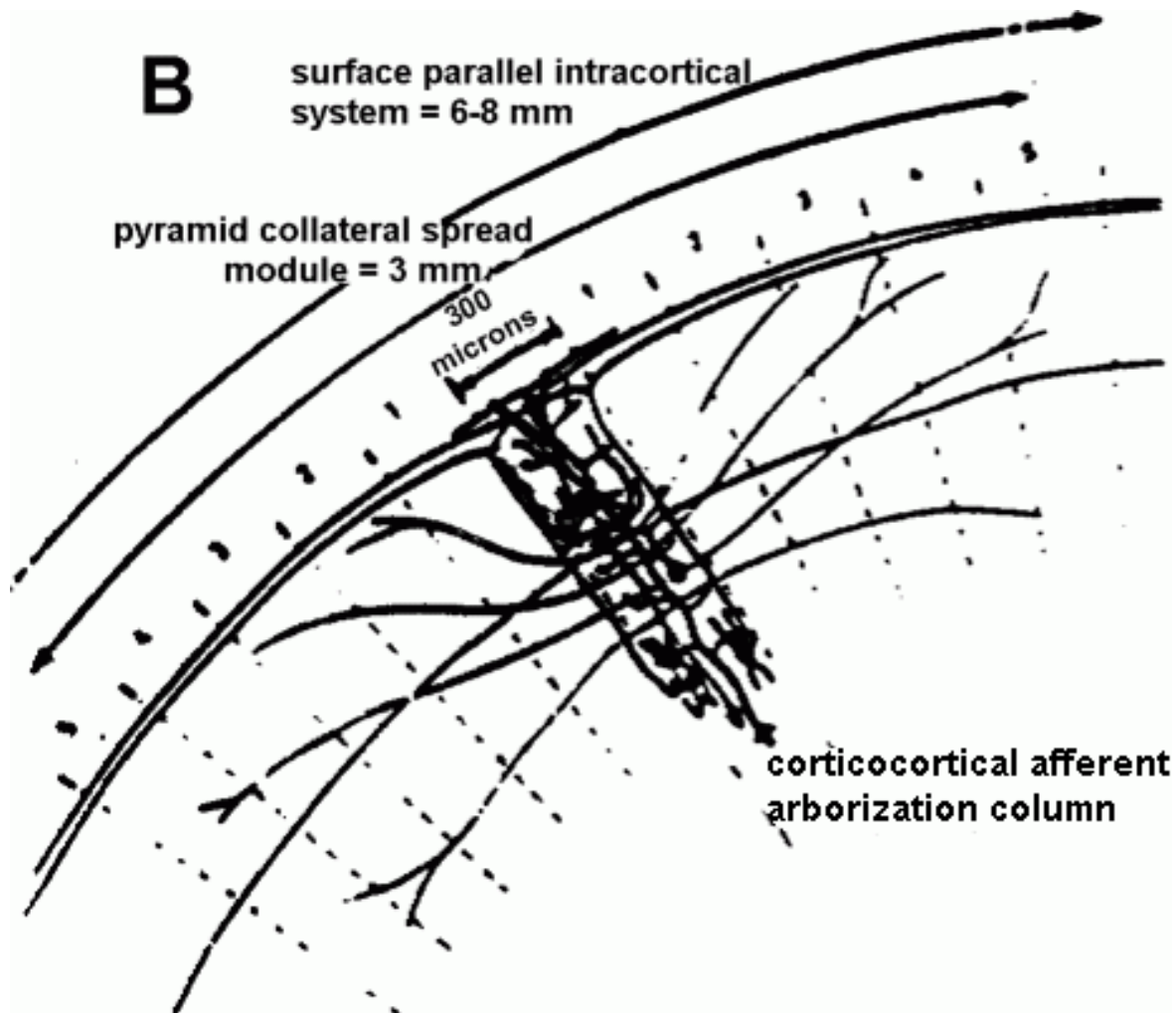


Fig. 2. ORGANISATION DES COLONNES CORTICALES.

- A. Principe de *migration des neurones* à partir de la zone basale le long des filaments gliaux. Ces derniers guident la répartition des neurones dans les différentes couches du cortex suivant une organisation en colonnes radiales.

(D'après Rakic, 1972.)



B. Disposition d'une colonne fonctionnelle (300 microns de diamètre) dans l'épaisseur du manteau cortical avec extension de ses connexions efférentes sur les colonnes voisines.

(D'après Szentagothai, 1975.)

C'est donc fondamentalement, la distribution des entrées, la nature des messages qu'il reçoit à traiter, autrement dit ses connexions extrinsèques, qui vont déterminer la spécificité fonctionnelle de l'opération de traitement assurée par le module. C'est de la combinatoire de ces modules et de leurs interconnexions que résulterait le fonctionnement intégré du néocortex. On estime, désormais, que pour un cerveau humain de $1\ 000\text{ cm}^3$ comportant un manteau superficiel de 2500 microns d'épaisseur couvrant une surface de $4\ 000\text{ cm}^2$, le chiffre de $600 \cdot 10^6$ minicolonnes peut être avancé, ce qui conduit à une estimation de $50 \cdot 10^{11}$ neurones regroupés dans environ 600 000 colonnes fonctionnelles.

Ces nouvelles conceptions révolutionnaires de l'organisation cérébrale réactualisent, de façon spectaculaire, une vue néo-localisationniste qui stimule actuellement les recherches contemporaines en direction à la fois du décryptage de la logique câblée de ces éléments modulaires et de l'identification des opérations fonctionnelles réalisées par ces modules. Elles ouvrent l'espoir d'un accès aux fonctions restées mystérieuses des secteurs associatifs du cortex cérébral et d'une identification des supports nerveux des opérations mentales (Fodor, 1983). Chaque unité modulaire fonctionnerait, en fait sur le principe d'une opération de reconnaissance de forme de la configuration des entrées qu'elle reçoit. Cette idée avait déjà été formulée par Fessard (1970), lorsqu'il évoquait la présence dans les réseaux nerveux centraux d'instruments de lecture de la configuration des activités nerveuses afférentes réalisant, selon ses termes, une opération de « reconnaissance de forme par appariements de configurations » Fessard considérait cette opération d'appariement comme résultant de la présence de structures d'accueil génétiquement engrammées dans la structure ou acquises et stabilisées par apprentissage, qui libéreraient des « programmes latents ». La plasticité de ces connexions et leur malléabilité fonctionnelle aujourd'hui démontrées permettent, en effet, d'envisager les mécanismes qui président à la différenciation fonctionnelle des colonnes au cours des phases précoces du développement et ultérieurement dans les processus de mémorisation. Ce qui amène à considérer, maintenant, les modalités d'un fonctionnement auto-organisateur du système

nerveux qui reposent sur la capacité de structuration initiale et de restructuration ultérieure des réseaux de connectivité interne de ce dernier.

LA PLASTICITÉ CONNEXIONNELLE ET L'AUTO-ORGANISATION

Le biologiste a toujours été frappé par les étonnantes capacités d'adaptation, de compensation, de restauration, de réorganisation dont le système nerveux est doté (voir Jeannerod et Hécaen, 1979). La physiologie de la machine organisée, avec son répertoire de programmes consolidés et ses régulations cybernétiques, peut difficilement rendre compte de cette étonnante plasticité adaptative. Nous sommes ici directement confrontés, s'agissant du fonctionnement du système nerveux, à une *fonction organisatrice* qu'il s'agit de comprendre et d'expliquer dans sa logique interne.

Nous resterons tout d'abord, et à titre d'exemple, sur le terrain de certains modèles expérimentaux qui permettent au psychophysiologiste d'accéder à l'exercice de cette fonction organisante, au moins dans le secteur de la sensorimotricité. Nous envisagerons, ensuite, ce que peuvent être les lois de transformation de la structure modifiable du système nerveux, telles qu'elles sont actuellement accessibles au neurobiologiste. Nous évoquerons, enfin, certains modèles, issus de la théorie des automates, susceptibles d'orienter l'identification des principes logiques qui régissent le fonctionnement des systèmes auto-organiseurs.

LA PLASTICITÉ DES COORDINATIONS VISUOMOTRICES

La plasticité des coordinations visuomotrices 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 d'expérience motrice dans les manifestations de plasticité des coordinations sensorimotrices.

EXPÉRIENCES DE RESTRICTION SÉLECTIVE DE L'EXPÉRIENCE MOTRICE

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 du 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 journallement, trois heures durant, à l'expérience visuelle d'un certain environnement standardisé. Le dispositif le plus classique est celui du fameux carrousel de Held et Hein (1963) 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 visuomoteur 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 ou tactiles par exemple. Ce chaton n'a pas organisé les coordinations visuomotrices 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 visuomoteur 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 (canne, outils, voiture) à 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.

EXPÉRIENCES DE « DÉCORRÉLATION SENSORIELLE »

Le prototype des expériences dites de « décorrélation 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 (1965) que l'on doit la systématisation d'une procédure expérimentale permettant d'aborder le 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 munir, à son insu, 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 pendant quelques minutes sa main qu'il déplace activement dans le champ de son regard; 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 ensuite effectués dans les mêmes conditions que précédemment.

Les résultats montrent que, dans le second cas, le sujet continue de pointer incorrectement la cible visuellement déplacée alors qu'après avoir fait l'expérience visuelle de ses propres mouvements il pointe cette fois en direction de la position physique correcte de la cible. 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 moteur 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. Toutefois, cette réorganisation est limitée aux jeux des articulations activées au cours de la période d'exposition. La réorganisation 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 a posteriori pour le réglage de l'action en cours (rétroactions ou actions en *feed-back*), soit encore a priori pour la planification de l'action, pour sa préparation et son anticipation (actions anticipatrices en *feed-forward*).

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 préciser le point d'application privilégié des fonctions transformatrices qui opèrent dans le système nerveux.

LES MODIFICATIONS STRUCTURALES DU SYSTÈME NERVEUX

Les modifications structurales du système nerveux, qui relèvent de la propriété de *plasticité*, intéressent essentiellement les modifications du plan de câblage, génétiquement prédéterminé, induites par les contraintes extérieures 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 (Hubel et Wiesel, 1979), travaux qui ont montré qu'une exposition de quelques heures à un environnement visuel composé uniquement de lignes verticales, par exemple, ceci entre la 5^e et la 6^e 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.

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 l'exercice de la fonction, au moins à ces phases critiques du développement.

Certains principes de redondance structurale ont pu être mis en évidence. Le concept « d'exubérance » synaptique a été proposé pour désigner le foisonnement de synapses surabondantes qui caractérise les états initiaux du système. Cette prolifération synaptique est maintenant clairement démontrée au niveau du cervelet, au niveau des projections callosales, dans les régions de projection des voies visuelles et dans celles de projection des voies de la somesthésie (voir revue de Crepel, 1982). On la découvre aussi maintenant au niveau spinal. C'est ensuite par un processus de dégénérescence sélective que les circuits stabilisés se mettent en place sous l'effet des modes de sollicitation du système par les stimulations de l'environnement. Depuis longtemps postulé par Changeux et Danchin (1974), ce processus élucidé au niveau des mécanismes moléculaires de la membrane trouve aujourd'hui un support dans les travaux électrophysiologiques portant sur la mise en place des configurations d'assortiment synaptique.

La biologie moléculaire raisonne aujourd'hui en termes de médiateurs de la transmission synaptique. Les molécules du 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 dérèglement 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. 3). 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 structural et biochimique des capacités de mémoire, d'engrammation, de stockage de l'expérience acquise qui représente un aspect fondamental du fonctionnement cérébral.

Le pouvoir de pénétration des techniques d'investigation moderne de la microcircuiterie du système nerveux ouvre des perspectives nouvelles. L'un des modèles expérimentaux actuellement les plus féconds nous est fourni par l'étude des modules sélecteurs de signaux visuels que l'on identifie dans les secteurs occipitaux du cerveau. Les signaux directement issus des récepteurs de la rétine convergent sur ces modules après relais dans les noyaux intermédiaires du thalamus. Il est possible de démontrer, grâce aux techniques de détection électrophysiologique de l'activité des neurones intramodulaires, que ces derniers réagissent comme des filtres d'accueil prédisposés pour n'accepter, par exemple, que les signaux nerveux engendrés par une barre lumineuse d'orientation définie et balayant le champ visuel dans une direction déterminée (détecteur d'orientation spécifique). Cette orientation est exprimée dans le langage des communications nerveuses par une configuration caractéristique de la topographie des adresses et de la succession temporelle des signaux issus de la rétine. Le neurone d'accueil agirait ainsi comme un détecteur de configuration qui ne libérerait son message de sortie que si cette configuration était activée au niveau de ses entrées. Il a été possible de démontrer que la prédisposition du filtre sélecteur résulte d'un ajustement progressif du pouvoir de transmission des synapses afférentes. La possibilité d'un remaniement de ces capacités de reconnaissance est, d'autre part, démontrable expérimentalement et le travail de Rauschecker et Singer (1981) présente un modèle susceptible de rendre compte des données recueillies. Il suffit d'admettre le principe que le pouvoir de transmission d'une synapse ne peut être modifié que par le jeu d'une activation des éléments présynaptiques (fibres afférentes) contingente d'une activation postsynaptique (neurone récepteur) pour pouvoir expliquer les faits observés par les trois règles suivantes :

1) Une connexion excitatrice accroît son pouvoir de transmission chaque fois que son fonctionnement s'exerce sur un neurone déjà activement sollicité.

2) Ce pouvoir de transmission diminue lorsque la synapse n'est pas sollicitée alors que le neurone récepteur est actif.

3) Ce pouvoir de transmission décroît lentement avec le temps, quelle que soit l'activité de la synapse, si le neurone récepteur n'est pas activé par d'autres sources.

On peut donc comprendre que la stabilité d'une configuration d'entrée tend, dans certaines conditions, à s'inscrire dans la connectivité nerveuse et à devenir prévalente pour la colonne concernée qui acquiert de ce fait une spécificité fonctionnelle. Ainsi pourrait être expliquée, sans avoir à rechercher dans le fonctionnement nerveux l'analogie d'un traitement mathématique complexe (Hoffmann, 1966), cette étonnante capacité reconnue au système nerveux de fonctionner comme un *extracteur d'invariance*. Les régularités, les covariations des entrées sensorielles, les configurations invariantes du monde extérieur prédisposent les structures d'accueil à consolider les connexions susceptibles de « reconnaître » ultérieurement ces formes privilégiées (voir figure 3).

Plus ambitieuses encore apparaîtront les perspectives offertes par certains modèles théoriques de la biologie contemporaine issus des théories de l'information, modèles que nous allons succinctement aborder maintenant.

LE MODÈLE DES SYSTÈMES AUTO-ORGANISATEURS

Les développements de la cybernétique comme science des communications dans les machines, qu'elles soient 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-organiseurs 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 (Atlan, 1972).

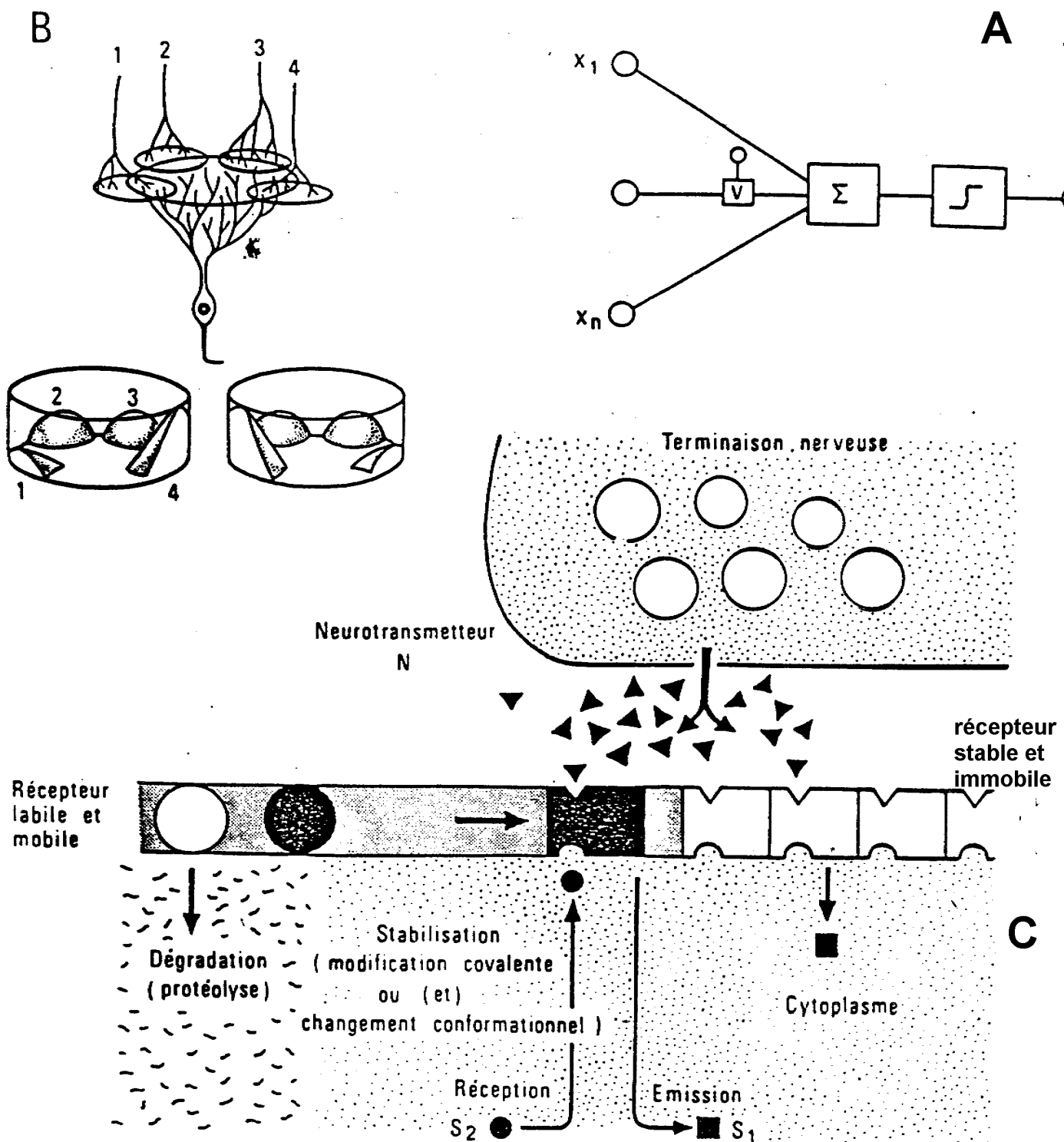


Fig. 3. Signaux de la stabilisation intracellulaire (S)

Fig.3. - MODÈLES DE FONCTIONNEMENT D'UNE UNITÉ DE DÉCISION.

A. *Modèle formel* d'une unité de séparation linéaire (d'après Uttley cité par Atlan, 1972). La structure intégratrice Σ recevant les informations de voies convergentes multiples ($x_1 \dots x_n$) déclenche la décision d'émettre un ordre sur la sortie lorsqu'un certain seuil (critère de décision) est atteint (\underline{f}). L'existence d'une fonction de modulation V des capacités d'intervention d'une voie afférente permet, par apprentissage auto-adaptatif, de prédisposer la structure d'accueil intégratrice à sélectionner une configuration donnée des informations afférentes. La décision ne sera prise que si cette configuration se présente à l'entrée. C'est le processus d'appariement de configurations.

B. *Représentation neuronale* hypothétique d'une fonction de décision recevant quatre voies afférentes (d'après R. Mark, *Memory and nerve cell connection*. Clarendon Press, Oxford, 1974). Le pouvoir de transmission respectif des quatre connexions synaptiques correspondantes est symbolisé par la hauteur des petites collines figurant à l'intérieur des cylindres du bas. La configuration d'accueil des messages afférents est modifiable par le jeu d'un changement durable de la réceptivité synaptique. La surface des membranes dendritiques du neurone réalise la fonction intégratrice du modèle figuré en A. Le segment initial d'axone est émetteur des messages impulsionnels qui vont sortir du neurone lorsque le seuil de décharge sera atteint.

C. *Modèle moléculaire* de réglage du pouvoir de transmission synaptique par stabilisation des protéines réceptrices du neurotransmetteur libérées par la terminaison nerveuse de la fibre afférente (d'après Changeux, 1976). Selon ce modèle, la protéine réceptrice existerait dans la membrane sous une forme labile et mobile. L'action conjuguée du neurotransmetteur (donc de l'activité synaptique) et d'un signal encore hypothétique S provoque la conversion de la forme labile du récepteur en forme stable.

Ce modèle s'appliquerait à la stabilisation des synapses labiles immatures au cours du développement sous l'influence des activités nerveuses circulaires. On peut supposer que le système mature conserve aussi un certain potentiel de modulation de la réceptivité synaptique. Un jeu étendu de remaniement des connexions interneuronales est observable pendant une grande partie de la vie chez l'Homme.

On signalera cependant qu'une autre problématique, issue de la thermodynamique des phénomènes irréversibles, tend à faire jouer un rôle au désordre statistique dans l'émergence de stationnarités « étranges » qui apparaissent dans des systèmes physiques éloignés de leur état d'équilibre (structures dissipatives). Il s'agit, là aussi, d'un processus d'auto-organisation susceptible d'intervenir dans la genèse et le maintien des formes vivantes (Prigogine, 1972). La théorie de l'information nous semble toutefois mieux convenir à la description des processus d'auto-organisation qui naissent dans les systèmes disposant déjà, au départ, à la fois d'une organisation fiable assurant leur autonomie et d'un potentiel de disponibilité suffisant pour alimenter la création de nouvelles structures. Le modèle physico-chimique, par contre, peut expliquer l'apparition d'une stationnarité ordonnée à partir d'un désordre primitif intégral et pourrait mieux s'appliquer à la description des étapes initiales de la biogenèse (voir Richelle et Seron, 1980).

L'APPORT DE LA THÉORIE DE L'INFORMATION

Pour s'en tenir à l'essentiel des principes qui se dégagent du modèle issu de la théorie de l'information 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*.

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

- 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. Une certaine redondance de modules spécifiés 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.

- la *fiabilité* du système, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il assure 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. 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 sa disponibilité en redondance.

- On démontre, dans ce dernier cas, que ce sont les contraintes 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 dans un système initialement redondant qui accroît ainsi sa propre organisation.

On doit à Von 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 présentant alternativement un pôle positif ou un pôle négatif. Tous ces cubes sont initialement introduits dans une boîte où ils s'entassent dans le plus complet

désordre. Il suffit alors d'agiter la boîte de manière purement aléatoire pour voir les cubes s'assembler magnétiquement par leurs faces de signes opposés 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, aucun 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.4*).

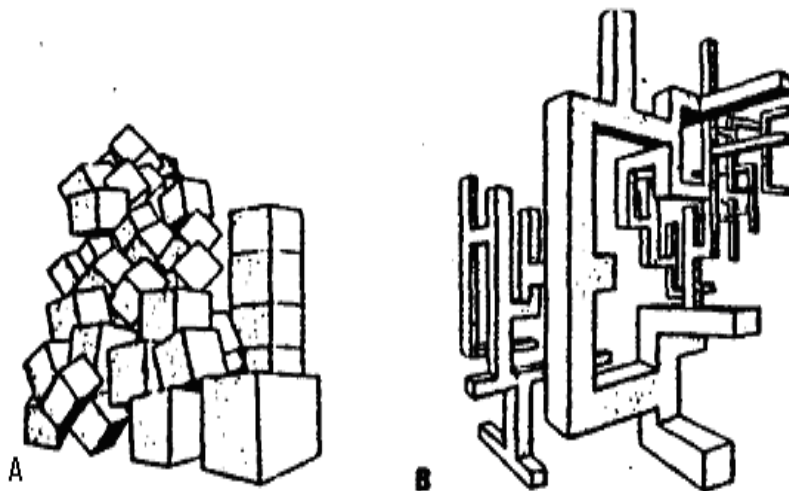


Fig. 4. - PRINCIPE DE CRÉATION D'ORDRE À PARTIR DU BRUIT.

Modèle de Von Foerster décrit dans le texte. État de l'ensemble des cubes aimantés avant (A) et après agitation de la boîte qui les contient (B).

(D'après Atlan, 1972.)

On notera de ce point de vue une évolution de la pensée scientifique au cours de ces dernières années qui est marquée par une prise de conscience de l'existence d'une classe de phénomènes liés au caractère aléatoire et fluctuant des contraintes de l'environnement (au sens de non prévisible pour le système) susceptibles de jouer un rôle positif organisateur et structurant sur les états non-stabilisés du système. C'est ce que l'on retrouve par exemple dans le modèle physico-chimique de Prigogine (ordre par fluctuations) comme dans le modèle issu de la théorie de l'information d'Atlan (complexité par le bruit).

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

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 augmenteraient l'organisation du système par un accroissement des contraintes entre ses éléments redondants et par suite par un enrichissement de sa complexité (voir fig. 5).

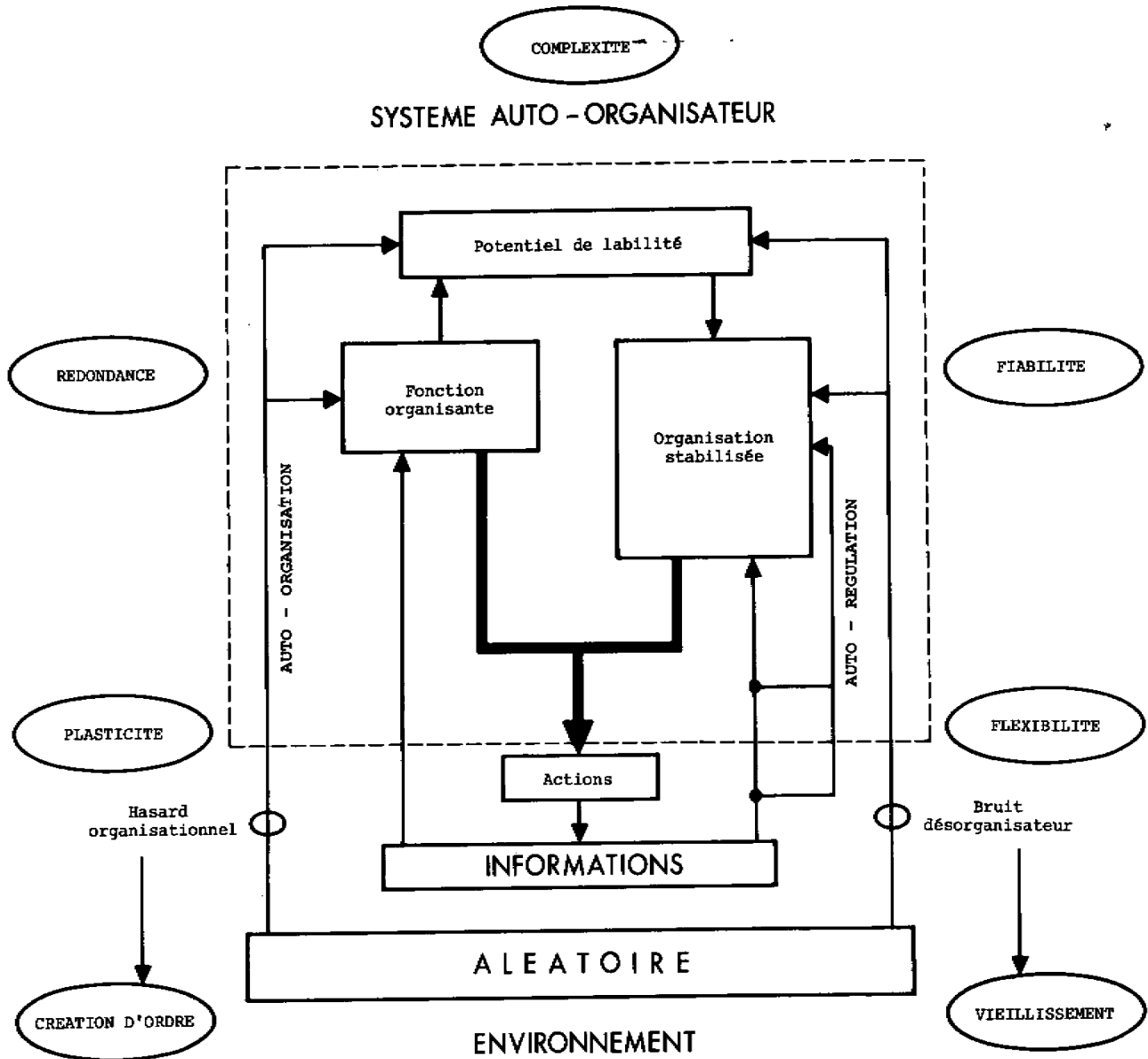


Fig. 5 – MODÈLE SIMPLIFIÉ D'UN SYSTÈME AUTO-ORGANISATEUR
Voir commentaires dans le texte.

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 (voir fig. 6).

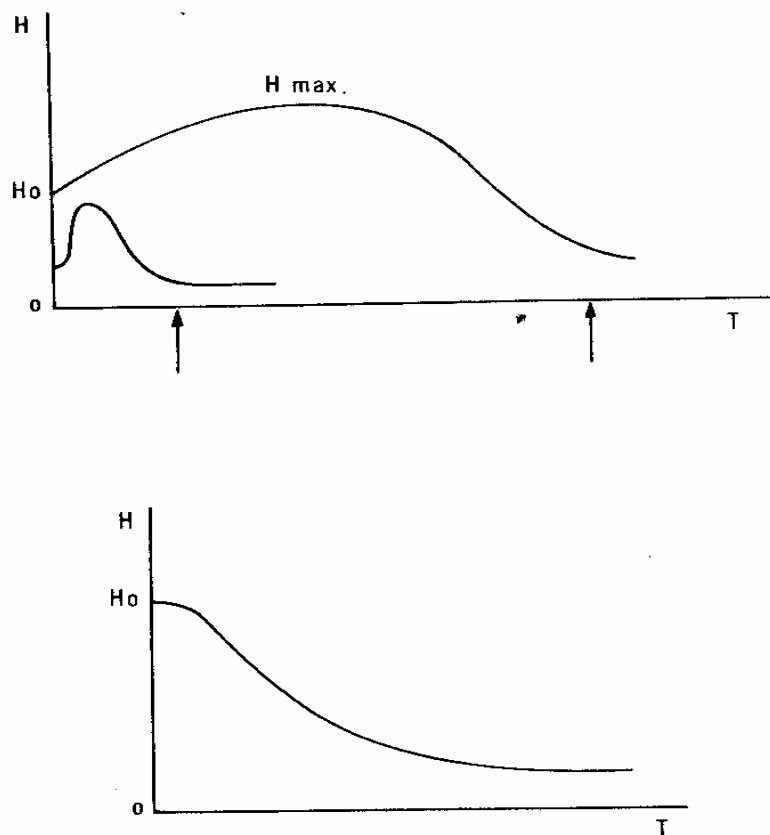


Fig. 6

Fig. 6. – ÉVOLUTION DE L'ÉTAT D'ORGANISATION D'UN SYSTÈME

La complexité du système est mesurée par la quantité H d'information qu'il contient. La fonction dh/dt exprime la variation de H au cours du temps. Elle est composée de deux termes : l'un positif correspondant aux effets organisateurs du bruit par réduction de la redondance structurale ; l'autre négatif correspondant aux effets destructeurs du bruit par diminution de la fiabilité. Un processus d'organisation existera si dh/dt est positif, au moins pendant la phase de croissance du système depuis son état initial H_0 jusqu'à son état de complexité maximale H_{max} qui correspond à l'annulation de dh/dt . Cette annulation traduit l'équilibre des deux processus antagonistes. dh/dt devient ensuite négatif du fait de l'épuisement progressif du potentiel de redondance alimentant le processus organisateur. La fonction $H(t)$ décroît sous l'effet devenu dominant des processus destructeurs. L'épuisement progressif de la redondance engage alors le processus irréversible du vieillissement conduisant à la mort du système (flèches). Les caractéristiques initiales du système (potentiel de redondance et fiabilité comme capacités de résistance aux erreurs) définissent la forme de son cycle vital individuel.

Les courbes du haut schématisent deux cycles d'évolution de systèmes auto-organiseurs à durée de vie différente.

La courbe du bas indique l'évolution de la fonction $H(t)$ dans un système organisé à faible redondance initiale. Le vieillissement du système est alors entièrement défini par sa capacité de résistance aux effets destructeurs (cas des systèmes organisés artificiels). (D'après Atlan. 1972.)

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 à sa fiabilité et qui va devenir l'instrument des interactions adaptatives entre l'organisme et son environnement et source d'aléatoire organisationnel. 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-organiseur mérite alors d'être avancée avec prudence toutefois car les risques d'une extension métaphorique abusive de la théorie du « hasard organisationnel » hors du champ de validité du modèle probabiliste formalisé par Atlan ne doivent pas être sous-estimés.

On éprouve, en effet, une difficulté croissante à concrétiser les fonctions du modèle probabiliste dans les réalités observables de l'objet d'étude au fur et à mesure que progressent nos connaissances déterministes de cet objet. La théorie toutefois a le mérite de cerner les contours d'un algorithme universel descriptif d'une stratégie générale des processus organisationnels à l'œuvre dans toute organisation vivante quel que soit le niveau de complexité où on l'étudie (J. Paillard, 1983).

L'ORGANISATION NERVEUSE COMME SYSTÈME AUTO-ORGANISATEUR

En conformité avec ce 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.

- 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, nous l'avons vu, à cinquante 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 500 000 milliards qui peut être avancé. Si l'on considère, en outre, qu'il nous faut ajouter à cette complexité structurale un 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.

- 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 (5016) qui spécifient le plan de câblage de la machine informationnelle. Le nombre des gènes contenus dans le stock chromosomique n'y suffirait théoriquement pas.

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, nous l'avons vu, aujourd'hui proposés. Il ne fait guère de doute, du point de vue qui nous intéresse ici, que cette prolifération initiale de connexions labiles surabondantes présente tous les caractères d'une redondance initiale du système nerveux que son activité fonctionnelle contribuera à spécifier. La labilité connexionnelle synaptique offre au plan structural un vaste réservoir de redondance et de disponibilité pour la spécification de nouvelles configurations d'activité nerveuse. On retrouve aussi au niveau des colonnes modulaires corticales initialement indifférenciées un autre palier de redondance utilisable par le processus organisationnel.

- 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 sa contribution positive et même nécessaire 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 de 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 discriminatives de l'observateur sans préjuger des capacités assimilatrices propres du système nerveux qui ne lui sont que partiellement accessibles (J. Paillard, 1983). Cette réserve étant faite, on peut chercher à identifier les sources éventuelles de « bruit » susceptibles d'influencer positivement la fonction organisatrice du système nerveux.

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 sensoriels. 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. On peut, en ce sens, dire que les fluctuations aléatoires qui bombardent nos divers organes des sens vont se trouver filtrées dans les structures asservissantes d'abord des collecteurs sensoriels puis des structures de traitement central du système prédisposés à « reconnaître », à assimiler certaines d'entre elles comme signifiantes pour le système. C'est l'inconnu, le nouveau qui suscite l'activité organisante, accommodatrice 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, 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. On notera, cependant, que cette conception classique des formations réticulaires subit actuellement une révision importante. A la conception de systèmes réticulaires diffus succède la notion d'espaces cyto-architectoniques beaucoup plus différenciés qu'on ne l'avait pensé. Les recherches modernes de Singer commentées plus haut ont cependant confirmé qu'une stimulation électrique de ces formations réalisait un contrôle « permissif » de la fonction de réorganisation synaptique observée sur son modèle d'analyse (colonnes du système visuel). On doit aussi tenir compte de l'existence de neuro-hormones à diffusion large, intervenant hors des sites synaptiques du réseau de connexions, qui exerceraient des actions modulatrices du même type.

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 systèmes activateurs à action diffuse. 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 entre effets organisateurs et perturbateurs du bruit. On pourrait aussi s'interroger sur l'utilité de la présence de générateurs 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, voir Bloch, 1976), voire même de la réactivation et de l'entretien des circuits existants (Jouvet, 1984).

Mais comment, dans cette ligne de réflexion, ne pas évoquer aussi le rôle de l'activité comportementale exploratoire. C'est l'inconnu, le non familier, l'imprévisible, l'absence d'ordre assimilable qui suscitent la curiosité exploratoire de l'organisme et qui alimentent le processus auto-organisant. C'est la motricité spontanée et sa contrepartie psychologique, le mouvement volontaire, dira autrement Jeannerod (1983), qui « alimente en information une machine qui ne cesse d'en réclamer pour se construire, puis pour fonctionner ».

LE PROBLÈME DE LA FIABILITÉ DES PERFORMANCES

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 de bons exemples 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 des bruits perturbateurs et destructeurs. 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 reconnues 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 nouvellement acquis 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, comme nous l'avons vu, 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 évoquera aussi, bien entendu, l'ensemble des dispositifs stabilisateurs de type *homéostasique* qui protègent le système contre les perturbations d'origine exogène ou endogène et dont l'importance grandit avec l'accroissement de l'autonomie de ce système à l'égard de l'environnement.

Ainsi, le système nerveux des vertébrés supérieurs peut-il, au moins théoriquement, 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 comme dans le modèle des cubes aimantés de von Foerster. Elles semblent, au contraire, s'ordonner suivant des directions privilégiées. Ce qui nous confronte 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 parvenus insensiblement au cœur d'un des débats les plus fondamentaux de la biologie contemporaine (Monod, 1970), celui que pose 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* (Phillips, 1977).

L'AUTO-ÉVALUATION ET LE CONTRÔLE INTENTIONNEL

Il ne peut entrer dans nos intentions d'aborder l'important problème des fonctions téléonomiques dans le cadre de ce bref exposé. Nous n'en retiendrons que quelques éclairages particuliers illustrant les nouvelles ouvertures que l'étude de ce domaine peut suggérer pour une meilleure compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'attention sélective, la prise de conscience et le contrôle intentionnel de nos actes moteurs en tant que médiateurs d'une fonction d'organisation d'ordre supérieur.

LES CRITÈRES D'ÉVALUATION

Qu'il suffise de rappeler le fil directeur d'une telle réflexion : la « vection » d'un 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 le *critère de survie* 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 son 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. Elle exprime un comportement.

C'est alors que l'organisme vivant peut prendre l'initiative des choix. Il devient capable de sélectionner l'environnement qui lui convient le mieux et ne plus être simplement choisi par lui. C'est le comportement qui, dès lors, devient un moteur de l'évolution (Piaget, 1976). 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 (Karli, 1976 et ce volume). C'est ainsi qu'on reconnaît 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 la 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 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*.

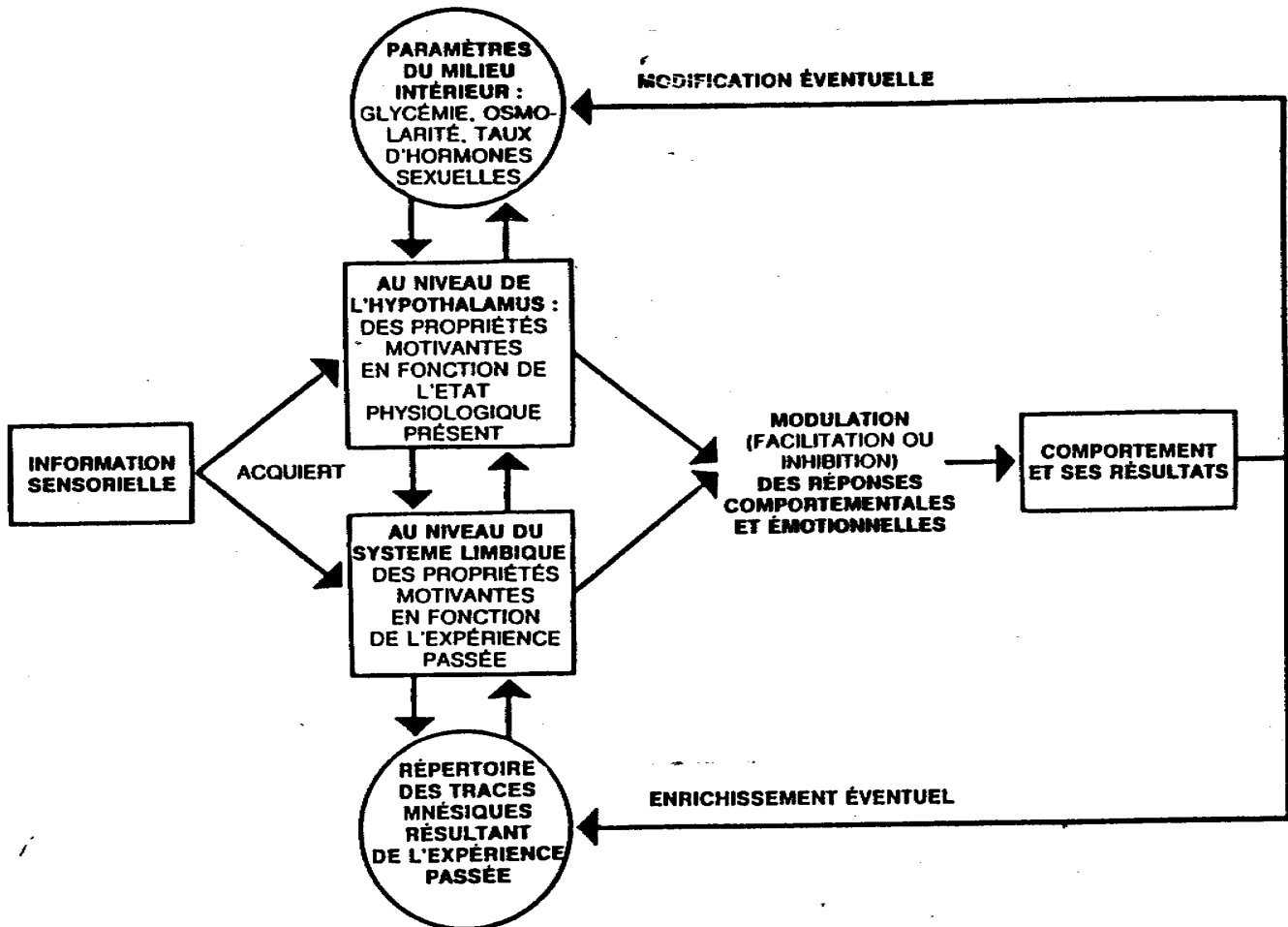


Fig. 7. SCHÉMA D'APRÈS KARLI (1976) DES MODALITÉS DE TRAITEMENT DES INFORMATIONS SENSORIELLES DÉCLENCHATRICES DES COMPORTEMENTS MOTIVÉS QUI SE TROUVENT CONFRONTÉES :

1) au niveau hypothalamique aux critères de convenance descripteurs de l'état physiologique du système à

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.

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 (voir Routenberg. 1978), dont l'étude physiologique a beaucoup progressé au cours des vingt 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 qui vont participer à des opérations évaluatives d'un type nouveau dont l'étude débouche très directement sur le problème des attributs et des conditions de la « prise de conscience »

LE PROBLÈME DE LA CONSCIENCE

La légitimité de considérer l'expérience subjective que nous avons du fonctionnement de notre appareil cérébral, expérience que nous qualifions de *consciente*, comme une réalité accessible à l'investigation scientifique est restée longtemps contestée (Sperry, 1969). L'attention, la volition, l'intention appartiennent à cette classe de facultés psychiques mystérieuses encore imprégnées du vieux dualisme du corps et de l'esprit. La dissociation du *volontaire* et de l'*automatique* révélée par la neuropathologie des apraxies a cependant très tôt posé le problème du substrat nerveux différencié de ces deux modalités de contrôle de l'activité motrice (voir J. Paillard, 1982c) ouvrant la voie aux modélisations systémiques, aux explorations expérimentales des structures impliquées et à la recherche des mécanismes mis en jeu.

L'ACTIVITÉ DE CONTRÔLE

On doit à MacKay (1966, 1980) d'avoir clairement proposé, dans le cadre des logiques cybernétiques du contrôle, les exigences requises pour l'émergence d'un *contrôle conscient* organisateur des conduites et des représentations perceptives du monde extérieur.

La figure 8B schématise la logique d'organisation cybernétique d'un système finalisé qui implique une opération de comparaison des entrées sensorielles avec un signal de référence qui définit la finalité prescrite au système. Il en résulte un signal de modulation du générateur de programmes d'action dont les sorties motrices vont contribuer à modifier

le flux des entrées sensorielles dans un sens qui tend à ajuster la rétroaction négative de manière à compenser l'action positive du signal de référence. L'action sera poursuivie jusqu'à ce que l'objectif prescrit par le signal de référence soit atteint.

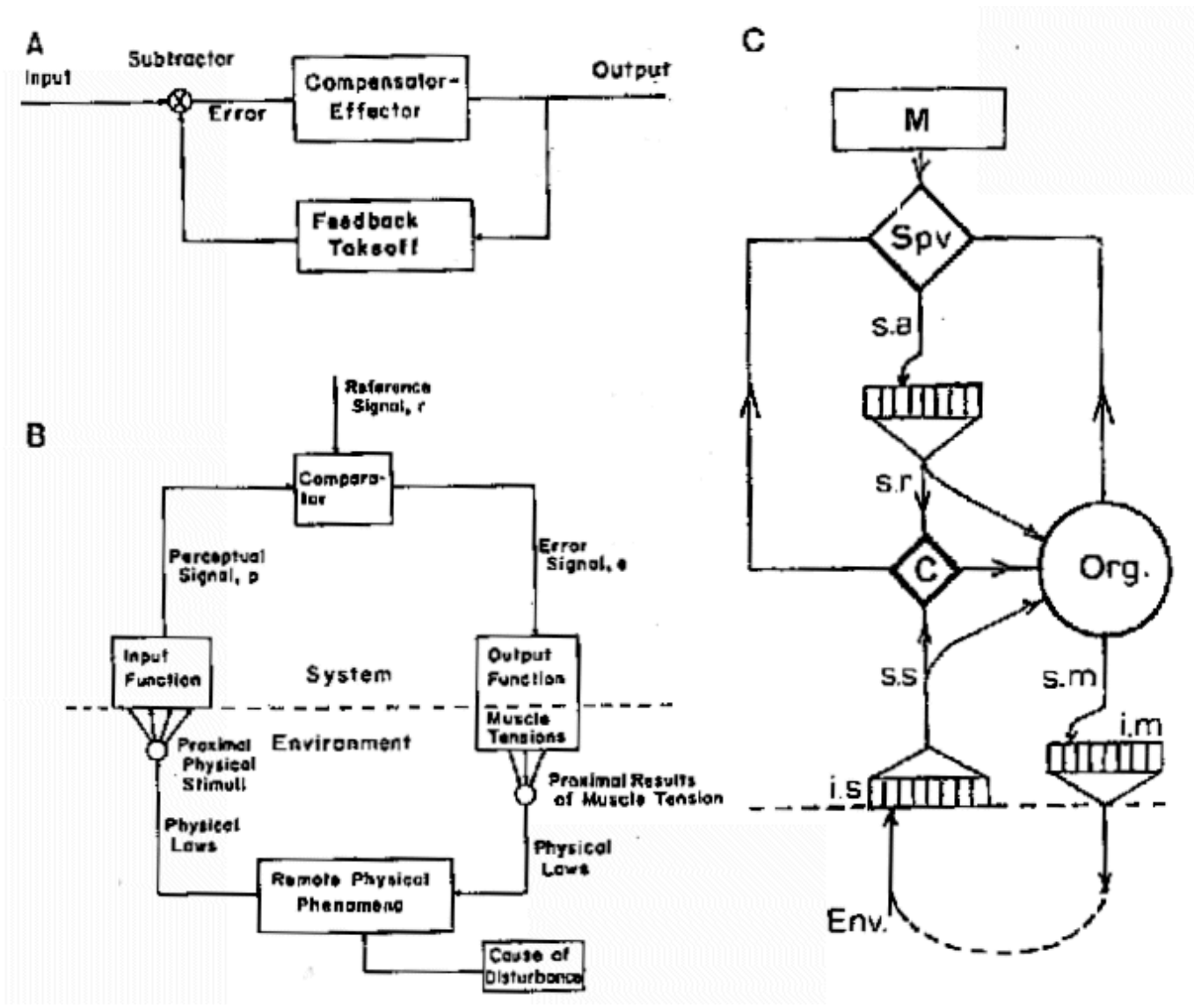


Fig. 8. – ÉLÉMENTS DE LA LOGIQUE CYBERNÉTIQUE

- A. *Modèle classique de Wiener* du système de contrôle de l'appareil neuromusculaire.
- B. *Modèle général de contrôle du comportement en feed-back* (d'après Powers, 1973). L'accent est mis sur le rôle du signal de référence qui définit, par sa grandeur, la variation prescrite de la variable contrôlée dans l'environnement (remote physical phenomena) en tenant compte des perturbations non contrôlées qui peuvent affecter cette variable (cause of disturbance). Les changements intervenus dans le phénomène physique sont traduits au niveau des organes sensoriels (input function) par certaines variables paramétriques (proximal physical stimuli). Ils donnent naissance aux messages sensoriels (perceptual signal) qui seront comparés (comparator) au signal de référence).

Il résulte de cette comparaison un signal d'erreur (error signal) traduit au niveau des organes moteurs (output function sous forme de tensions musculaires (muscle tensions) productrices d'effets mécaniques (proximal results of muscle tension) qui modifient le phénomène physique contrôlé. L'action cesse lorsque le signal d'erreur est annulé, c'est-à-dire lorsque les conséquences sensorielles de l'action sont en conformité avec les valeurs prescrites par le signal de référence.

C. *Modèle de MacKay* (1980). L'organisateur d'action Org. opère une sélection des instruments moteurs (i.m.). Les instruments sensoriels « i .s . » captent les stimulations de l'environnement Env. Le comparateur C opère une comparaison entre le signal de référence S.r et les signaux sensoriels S.S de manière à modifier l'état interne de l'organisateur Org. qui sélectionne les commandes motrices (S.m) appropriées. Ce schéma est conforme à celui décrit en B.

le superviseur Spv reçoit une information sur l'état interne de l'organisateur Org. et sur l'état du comparateur, consulte les mémoires du système M et opère une évaluation qui commande la sélection d'une stratégie d'action (s.a.). Voir commentaires dans le texte.

MacKay propose alors de concevoir un nouveau compartiment du système capable d'évaluer, et donc de choisir, une référence parmi d'autres possibles. Ce type d'évaluation conduira à accorder la priorité à tel ou tel objectif de l'action selon les moments et les situations, ce qui représente bien effectivement l'un des attributs majeurs d'un évaluateur « intelligent » apte à formuler ses projets propres et à mettre en œuvre les moyens de les accomplir. On passe ici du système asservi à une prescription donnée à un système doté d'auto-détermination de ses propres prescriptions, après consultation de ses mémoires. L'hypothèse ici suggérée est que le corrélat physique de « l'expérience consciente » n'est pas à rechercher dans le fonctionnement des structures de réception des informations sensorielles, ni même dans l'exercice des coordinations sensorimotrices adaptatives, mais dans l'activité « organisante » de cette superstructure évaluative qui constituerait au sein du système nerveux ce que MacKay désigne comme un *superviseur*. Les opérations psychiques mises en jeu à ce niveau seraient donc essentiellement des *opérations d'évaluation* qui doivent en conséquence disposer de leur propre référentiel de valeurs.

En outre, il suffit de concevoir l'interaction hétérarchique d'unités internes au superviseur autonome pour le doter des conflits, des oscillations, de la spontanéité dans le choix des priorités qui sont les caractéristiques familières de l'expérience subjective que nous avons de nos prises de décision. Nombreuses sont bien entendu les opérations évaluatives des niveaux inférieurs qui ne nécessitent pas le recours au contrôle du superviseur et qui s'exécutent « inconsciemment » ou automatiquement. Le superviseur réalise, en fait, *l'auto-évaluation* de son propre fonctionnement.

MacKay souligne aussi les implications d'un tel formalisme sur le contenu du modèle interne que se constitue l'organisme comme représentation unifiée du monde extérieur, modèle qui reposerait non plus, comme le veulent les conceptions classiques, sur une carte de projection sensorielle comme support direct de « l'image » perceptive mais sur l'expérience intégrée que possède le sujet de l'actualisation de l'état réactionnel (conditional readiness) de ses instruments moteurs. Dans une telle perspective, le corrélat normal de l'expérience perceptive ne serait plus à rechercher au niveau du message sensoriel filtré par les transducteurs périphériques mais dans l'opération d'évaluation qu'en ferait le superviseur en vue d'engendrer la prédisposition réactionnelle de l'organisateur. Dès lors, le contenu de l'expérience perceptive se confondrait avec la représentation interne de l'état de l'organisateur d'action réinjectée récursivement sur le superviseur.

On retrouve ici, cette conception du percept comme résultat d'une transformation interne orientée par les exigences de la prédisposition à l'action déjà clairement présentes dans de nombreuses théories philosophiques ou psychologiques de la perception. On y retrouve aussi la thèse défendue par Powers dès 1973, sur la base d'une modélisation cybernétique, thèse qui, par un retournement conceptuel des idées dominantes, proposait de considérer le comportement non plus comme une activité contrôlée par la perception mais comme le résultat d'un contrôle de la perception par l'action.

MacKay reconnaît, en fait, deux fonctions parallèles exercées par le superviseur : d'un côté l'auto-détermination des objectifs prioritaires comme organisateurs des conduites et corrélativement, de l'autre, l'adaptation continue de la prédisposition à réagir

aux conditions changeantes de l'environnement comme organisateur de d'expérience perceptive. L'exercice de ces deux fonctions constituerait le corrélat dans l'expérience consciente de ce que nous désignons habituellement sous le terme de *décision* et de *volition* d'une part, de *perception* et d'*attention* d'autre part.

LA « PRISE DE CONSCIENCE »

Il importe, dès lors, de se poser la question du support nerveux sur lequel les fonctions d'un tel superviseur s'accomplissent. Il est possible de caractériser chez l'Homme la présence ou l'absence d'une *expérience consciente* par la relation verbale qu'il peut en donner. Il devient possible sur cette base de rechercher empiriquement les structures impliquées dans l'émergence de cette « prise de conscience ». Les approches neuropsychologiques se trouvent ici directement concernées (Newcombe, 1984). Trois ordres de données expérimentales peuvent être invoqués :

a) L'idée dominante fut longtemps que le néocortex constituait le niveau supérieur des fonctions intégratives du système nerveux (Sherrington, 1906). L'expérience consciente devait résulter, d'une manière ou d'une autre, de d'activité cérébrale dans son ensemble sans que puisse être localisé un « centre » spécifique responsable d'une telle fonction. Les physiologistes n'hésitèrent pas, par exemple, à faire de la projection corticale des informations sensorielles la condition nécessaire de leur accès à la prise de conscience. Cette condition apparaît toutefois comme non suffisante dès lors que l'électro-encéphalographie permet de mettre en évidence une activité corticale, spontanée ou évoquée par les stimulations sensorielles, non corrélée avec les états de conscience (sommeil, coma). C'est à Penfield (1938) que l'on doit une avance décisive dans ce domaine sur la base d'observations cliniques de sujets conscients et éveillés au cours d'interventions chirurgicales sur le cerveau. La matière cérébrale, par ailleurs indolore, peut être manipulée ou massivement excisée sans jamais occasionner de perte de conscience.

Par contre, toute agression mécanique ou électrique portée sur les structures thalamiques diffuses provoque immédiatement l'inconscience du sujet. Penfield développera sa conception du centrencéphale comme constituant le substratum indispensable à l'expérience consciente sans pour autant méconnaître la participation nécessaire des structures néocorticales à l'élaboration du contenu de cette expérience.

On peut rappeler que Pavlov inférait déjà de ses travaux expérimentaux que les stimulations pouvaient produire soit une activation corticale diffuse et générale (irradiation), soit une activité focale plus spécifique (concentration-différenciation). La découverte des fonctions réticulaires par Magoun devait donner un support à la conception d'un système activateur ascendant responsable de l'ajustement global des niveaux de vigilance mais elle dégagait aussi la fonction d'un mécanisme d'activation focale plus sélectif et spécifique. Le *système thalamo-cortical diffus* est apparu, par la richesse de ses relations couplées avec la plupart des aires associatives du néocortex, comme un candidat sérieux à l'accomplissement de cette fonction (Samuels, 1959). En accord avec les conceptions centrencéphaliques de Penfield, ces structures peuvent apparaître comme impliquées dans le contrôle du flux continu des états de conscience. Elles apparaissent, en tout cas, directement impliquées dans le contrôle des oscillations rythmiques de l'activité corticale. Certains travaux récents utilisant l'analyse fréquentielle de l'EEG comme révélateur des couplages thalamo-corticaux établissent une corrélation très significative entre cet indicateur et le « style cognitif » des sujets (Robinson, 1982). Des rythmes thalamo-corticaux spécifiques de divers types d'immobilisation attentive ont, par ailleurs, été identifiés chez le chat (Rougeul-Buser, 1984). On rappellera également la description déjà ancienne de l'« arrest réaction », obtenue par stimulation électrique de ces mêmes régions, qui conduit à un véritable « enrayement » du comportement laissant l'animal figé dans une attitude stuporeuse qui disparaît dès que cesse la stimulation. L'analogie avec les « absences » épileptiques qui coupent transitoirement le sujet de son contact conscient avec le monde extérieur a également été soulignée.

Ainsi, le rôle des formations thalamiques diffuses dans l'orientation sélective des processus attentionnels, dans l'élaboration des états de conscience et dans l'auto-détermination des objectifs de l'action peut aujourd'hui être considéré comme une hypothèse plausible.

b) Un second champ d'expérience devait corroborer un tel point de vue. Il concerne les observations de patients ayant subi une section chirurgicale des liaisons callosales unissant les deux hémisphères cérébraux (Sperry, 1966 ; Gazzaniga et Ledoux, 1978). On sait qu'il est possible de solliciter indépendamment ces deux moitiés du cerveau qui se conduisent comme deux organisateurs autonomes capables de mener en parallèle des opérations cognitives, d'acquérir leur propre expérience et d'adopter des conduites parfois contradictoires. Chacun paraît, en outre, capable d'exercer pour son compte une opération de prise de conscience. Ces faits devaient conduire Sperry (1966), en particulier, à postuler l'existence chez ces sujets de deux flux de prise de conscience et de prise de décision intentionnelle, de deux personnalités autonomes. Sans entrer ici dans le détail des expérimentations conduites sur ce terrain, on soulignera un constat essentiel : cette autonomie de fonctionnement des deux cerveaux ne met jamais en cause *l'unité du sujet* et sa capacité, de résoudre les contradictions ou les conflits de priorité pouvant résulter des expériences propres à chacun des hémisphères pris individuellement. L'attention qui dirige la prise de conscience doit être distribuée *alternativement* l'une et l'autre des opérations engagées parallèlement par les deux hémisphères et ne peut être faite simultanément. Ce qui amène MacKay (1980) à conclure que la structure organisatrice de son modèle a probablement un support néocortical mais que le superviseur doit nécessairement se trouver dans la partie non divisée des structures nerveuses. Ce qui nous ramène à la conception centrencéphalique de Penfield et peut évidemment poser le problème des conséquences que pourrait avoir chez ces sujets une séparation chirurgicale des commissures thalamiques laissant prévoir un dédoublement de la personnalité.

c) Nous évoquerons brièvement un troisième champ d'expérience inauguré par Libet (1966), qui, utilisant la stimulation électrique du cortex somesthésique chez le sujet

éveillé et conscient, accède à une analyse des constantes de temps nécessaires à l'élaboration d'une prise de conscience : 500 msec seraient nécessaires pour qu'un train de stimulation appliqué à la surface du cortex éveille la prise de conscience de la présence du stimulus ; combinant une stimulation corticale à une stimulation cutanée périphérique, il montre que cette dernière accède plus précocement à la conscience et il aborde l'intéressant problème de l'indexation temporelle de ces événements. La prise de conscience est désormais entrée dans le champ de l'expérimentation psychophysique.

DUALISME ET MONISME

On peut, dès lors, s'interroger sur la nature de la circuiterie susceptible d'engendrer un tel phénomène. Cette interrogation, que les progrès de nos connaissances rend aujourd'hui justifiée, vient curieusement de réveiller chez les neurophysiologistes la vieille querelle du dualisme et du monisme (Popper et Eccles, 1977 ; Sperry, 1980 ; Szentagothai, 1984). Sans entrer dans l'argumentation de cette polémique moderne, on retiendra que la neuroanatomie avait révélé depuis longtemps l'importance des boucles verticales cortico-thalamiques dans le fonctionnement cérébral. Ces structures médianes et intralaminaires du thalamus dit « diffus » sont effectivement le siège d'un bouclage récursif sur l'ensemble des colonnes corticales. Szentagothai (1984) a insisté sur la coexistence dans l'organisation nerveuse de structures connectées de manière rigoureuse et dont la logique de fonctionnement repose sur l'agencement déterminé de la microcircuiterie interne, alors que d'autres secteurs semblent échapper au mode de structuration modulaire qui caractérise les premières (formations réticulaires des régions identifiées comme centrencéphaliques par Penfield). On évoque alors, ici, un mode de fonctionnement qui pourrait s'apparenter au *principe d'ordre par fluctuation* des théories de Prigogine (1979). Ces structures, soumises aux influences multiples des bouclages récursifs qui les associent au fonctionnement des diverses colonnes néocorticales sélectivement activées par les

processus attentionnels, se comporteraient sous l'effet de ces fluctuations comme des *structures dissipatives* de la thermodynamique capables d'engendrer des stationnarités temporaires, des états de non-équilibre transitoirement maintenus, modifiables suivant les résonances ou amplifications qui résultent du couplage d'oscillateurs multiples. L'ordonnance et l'unité des états de conscience, dont la conscience de soi, émergeraient alors de ces interactions. Aussi séduisante soit-elle, une telle interprétation ne semble cependant pas de nature à autoriser le biologiste, grisé par ses succès récents sur les démons du vitalisme et de la finalité, à prétendre aujourd'hui qu'il a, aussi, exorcisé le démon de l'« Esprit » qui hantait le corps de l'« Homme neuronal » (Changeux, 1983). Tout au plus commençons-nous 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 de nos perceptions et de nos conduites.

CONCLUSIONS

En matière de conclusion, nous retiendrons un texte de J.-L. Levy (1976), remarquable de concision et de pénétration. Reprenant l'éblouissante formule de Paul Valéry « Nous naissons avec du possible inné », J.-L. Levy nous rappelle que « le cerveau est par excellence l'organe du possible, du maximum de possible » compatible avec la survie, en soulignant la dichotomie du « possible programmé » et du « possible non programmé ». « Ici, le cerveau précâblé déclencheur de programmes. Là, un nombre infini de degrés de liberté. Ici, un répertoire de conduites, plus ou moins stéréotypées. Là, les ressources quasi inépuisables de la combinatoire. Ici, la poursuite d'un but. Là, l'imprévisible. Ici, la satisfaction de besoins élémentaires. Là, une création continue de structures nouvelles, A partir de leurs lois de transformation. Ici et là, deux potentialités exploratoires : la recherche du plaisir et la recherche des significations. L'une et l'autre

asservies aux mêmes conditions de fonctionnement, aux mêmes équations de conditions, aux fins de gérer les influx et d'alimenter l'incessant dialogue entre stimulus et engrammes. »

La nécessaire distinction entre machine organisée et machine organisante (J. Paillard, 1977) nous aide, en effet, à mieux comprendre ce qui dans l'organisation du dialogue qui se poursuit entre l'organisme et l'environnement, va relever des performances de l'une ou de l'autre : dans l'une l'autorégulation stabilisante des fonctionnements cybernétiques, dans l'autre la logique de l'auto-organisation créatrice de formes nouvelles.

Fruit d'une longue évolution complexifiante des organisations biologiques, le cerveau humain peut aujourd'hui nous apparaître comme l'achèvement fonctionnel le plus réussi auquel puisse conduire le nécessaire compromis entre le conservatisme et l'innovation créatrice qui marquent l'orientation du processus organisationnel des formes vivantes.

On s'est parfois étonné du contraste qui existe entre les tendances conservatrices des grandes fonctions physiologiques et la tendance conquérante à l'élargissement de ses pouvoirs d'action qui caractérise toute l'évolution des êtres vivants et qui culmine chez les espèces dotées d'un système nerveux complexe. Les premières apparaissent comme figées dans leur succès. Elles consacrent, en effet, la réussite fonctionnelle de l'organisation d'une machine métabolique à haut niveau de fiabilité qui, par le jeu de ses auto-régulations cybernétiques, entretient la survie d'une collectivité cellulaire organisée à l'abri dans un milieu intérieur stabilisé qui la protège des agressions et des aléas d'un environnement incertain. Au sein de cette collectivité cellulaire, le système nerveux interviendra essentiellement par sa partie rigidement câblée pour assurer le jeu des communications internes nécessaires à la coordination harmonieuse et intégrée des activités de la communauté. Il interviendra aussi pour organiser les activités de relation avec le monde extérieur et pour coordonner le jeu des instruments comportementaux qui prolongent et amplifient celui des régulations physiologiques au service des fonctions de conservation de la structure. La machine énergétique, toutefois, paie sa grande fiabilité d'un faible potentiel de redondance disponible qui confine sa capacité d'évolution et d'adaptation

dans des marges étroites et lui fixe une durée de vie limitée aussi caractéristique de l'espèce que les caractères morphologiques génétiquement prédéterminés des individus qui la composent.

A l'opposé, et sans doute en corollaire de la propriété précédente, la tendance expansionniste s'exprime au plus haut degré dans la capacité auto-organisante et innovatrice du système nerveux de l'Homme. Véritable machine informationnelle, elle poursuit son évolution complexifiante à l'abri d'une machine énergétique fiable qui l'affranchit des exigences thermodynamiques les plus contraignantes. A la complexité de son organisation propre et au potentiel élevé de redondance dont elle dispose vont répondre la liberté de son fonctionnement et l'autonomie grandissante qu'elle conquiert sur les contraintes des réalité physiques qu'elle affronte. A la création d'un milieu intérieur stabilisé qui consacre l'autonomie de la machine énergétique répond la création d'un modèle interne de la réalité physique qui libère la machine informationnelle des contraintes du dialogue direct avec son environnement, réalisant ainsi dans ces deux compartiments de leur organisation les conditions de la liberté et de l'indépendance des systèmes vivants.

A poursuivre cette démarche, et comme dans la découverte des emboîtements d'intégrons organiques, on accède à un nouveau palier fonctionnel : celui qui intègre l'organisme individuel au sein d'un système social. Ce dernier engendre de nouveaux langages de communication interindividuelle ; il crée des institutions organisées aux fonctions diversifiées ; il élabore ses systèmes de valeurs et de règles ; il développe ses mémoires culturelles. En intégrant des collectivités humaines de plus en plus nombreuses le système social accède lui-même au statut de système auto-organisateur indépendant. En retour, il instruit directement le système nerveux individuel des codages symboliques du langage communautaire et il amplifie la puissance de représentation interne de l'instrument cognitif individuel jusqu'à lui permettre d'exprimer et de partager avec ses semblables la connaissance qu'il a de lui-même, comme être singulier et conscient pensant et agissant pour lui-même.

Les conditions se trouvent alors réunies pour la création d'un nouvel instrument d'assimilation, mais d'assimilation conceptuelle cette fois, dialoguant avec ses mémoires, doté de ses opérateurs logiques fiables, de ses critères de cohérence, de ses déterminations implicatrices, de ses inférences inductives et de son appétit d'intelligibilité. Le système de la connaissance scientifique en émerge au niveau social avec son organisation, son évolution, ses capacités créatrices d'ordre, ses stratégies exploratoires, ses critères d'objectivité, ses tendances conservatrices, ses mémoires culturelles et son insatiable appétit d'invariance et d'unité.

On ne s'étonnera guère de retrouver ici les grands thèmes de la « Saga » piagétienne dont le constructivisme dialectique s'intègre de manière très remarquable au mouvement de la biologie théorique contemporaine (J. Paillard, 1982 b).

A tous les niveaux on retrouve les mêmes principes qui fondent la logique des processus organisationnels à l'œuvre dans toute organisation vivante, y compris ceux qui définissent leurs conditions d'accès au statut de générateur autonome d'organisation. Ainsi, les formes fonctionnelles et leur filiation évolutive s'inscrivent-elles dans le prolongement direct de la filiation des structures organiques. Elles en restent étroitement solidaires et partageront le même destin : celui de toutes ces organisations génératrices de stationnarités locales dans un univers inéluctablement emporté par le flux entropique universel et qu'il est convenu de qualifier de vivantes précisément parce qu'elles sont mortelles.

Jacques PAILLARD.

BIBLIOGRAPHIE

- AGID Y., *La neurotransmission*, dans « Rev. Neurol. », 139, Paris, 1983, pp. 539-545.
ATLAN H., *L'organisation biologique et la théorie de l'information*, Hermann, Paris, 1972, 296 p.
ATLAN H., *L'émergence du nouveau et du sens*, dans P. Dumouchel et J.P. Dupuy (Eds), *L'auto-organisation. De la Physique au Politique*, Le Seuil, Paris, 1983.

- BLOCH V., *Brain activation and memory consolidation*, dans Rosenzweig M.R., Bennet E.L. (Eds), *Neural mechanism of learning and memory*, MIT Press, Cambridge Mass., 1976, pp. 246-265.
- CASTORIADIS C., *Les carrefours du labyrinthe*, Le Seuil, Paris, 1978, 316 p.
- CHANGEUX J.P., *Les communications cellulaires*, dans « Sciences et Avenir », 1976, pp. 246-265.
- CHANGEUX J.P., *L'Homme neuronal*, Fayard, Paris, 1983, 419 p.
- CHANGEUX J.P. et DANCHIN A., *Apprendre par stabilisation sélective de synapses au cours du développement*, dans Morin E. et Piatteli M. (Eds), *L'Unité de l'Homme*, Le Seuil, Paris, 1974, pp. 320-357.
- CREPEL F., *Regression of functional synapses in the immature mammalian cerebellum*, dans « TINS », 5, 1982, pp. 266-269.
- ECCLES J.C. (Ed.), *Brain and Conscious experience*, Springer Verlag, New York, 1966.
- FESSARD A., *Les problèmes du code nerveux*, dans Marois M. (Ed.), *Theoretical Physics in Biology*, North Holland Pub., New York, 1968, pp. 230-245.
- FESSARD A., *Approche neurophysiologique des problèmes de la mémoire*, dans « Sympos. Assoc. Psychol. Sc. L.F. - La Mémoire », P.U.F., 1970, pp. 59-98.
- FODOR J.A., *The Modularity of Mind*, MIT Press, Cambridge Mass., 1983, 145 p.
- GAZZANIGA M.S. et LEDOUX J.E., *The integrated Mind*, Plenum Press, New York, 1978.
- GOODALE M.A., *Vision as a sensorimotor system*, dans Robison T.E. (Ed.), *Behavioral approach to Brain Research*, Oxford Un. Press, New York, 1982, pp.41-61.
- HELD R., *Plasticity in sensory-motor systems*, dans « Sc. Amer. », 213, 1965, pp. 84-94.
- HELD R. et HEIN A., *Movement produced stimulation in the development of visually guided behavior*, dans « J. Comp. Physiol. Psychol. », 56, 1963, pp. 872-876.
- HOFFMANN W.C., *The Lie Algebra of visual perception*, dans « J. of Math. Psychol. », 3, 1966, pp. 65-98.
- HUBEL D.H. et WIESEL T.N., *Brain mechanisms of vision*, dans « Sc. Amer. », 241, 1979, pp. 150-162.
- IBERALL A.S., *Toward a general Science of viable systems*, Mc Graw Hill, New York, 1972, 414 p.

JEANNEROD M., *Le cerveau-machine*, Fayard, Paris, 1983, 226 p.

JEANNEROD M. et HECAEN H., *Adaptation et restauration des fonctions nerveuses*, SIMEP, Villeurbanne, 1979, 392 p.

JOUVET M., *Éveil, Sommeil, Rêve*, Courrier du C.N.R.S., 55-56, 1984, pp. 40-48.

KARLI P., *Neurophysiologie du comportement*, dans Kayser C. (Ed.), *Physiologie*, tome 2, Flammarion, Paris, 1976, pp. 1331-1429.

LE MOIGNE J.L., *L'axiomatique de la modélisation*, dans « *Économie et Société* » 14, n° 8-9-10, 1980.

LE MOIGNE J.L., *Sciences de l'autonomie et autonomie de la Science*, dans Dumouchel P. et Dupuy J.P., *L'auto-organisation. De la Physique au Politique*, Le Seuil, Paris, 1983, pp. 521-536.

LEVY J.C., *Le cerveau ou de possible inné*, dans « *Rev. EEG, Neurophysiol.* », 6, Paris, 1976, pp. 491-494.

LIBET B., *Brain stimulation and the threshold of conscious experience*, dans Eccles J.C. (Ed.), *Brain and Conscious experience*, Springer Verlag, New York, 1966, pp. 165-181.

MacKAY D.M., *Cerebral organization and the conscious control of action*, dans Eccles J.C. (Ed.), *Brain and conscious experience*, Springer Verlag New York, 1966, pp. 422-445.

MacKAY D.M., *Neural basis of cognitive experience*, dans Szekely Gy., Labos E. et Dampanovich S. (Eds.), *Neural communication and Control*, dans « *Adv. Physiol.Sci.* », 30, 1980, pp. 315-332.

MONOD J., *Le hasard et la nécessité*, Le Seuil, Paris, 1970, 244 pp.

MORIN E., *La Méthode*, vol.2, *La Vie de la Vie*, Le Seuil, Paris, 1980, 472p.

MOUNTCASTLE V., *An organizing principle for cerebral fonction : the unit module and the distributed system*, dans Edelman G. et Mountcastle V. (Eds), *The mindful brain*, MIT Press, Cambridge Mass., 1978, pp.7-50.

NEWCOMBE F., *Neuropsychology of consciousness : Human clinical evidence*, dans Oakley D.A. (Ed.), *Brain and Mind*, Methuen, Londres, 1984.

PAILLARD J., *Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace*, dans « *Cahiers de Psychol.* », 14, 1971, pp. 261-316.

PAILLARD J., *La machine organisée et la machine organisante*, dans « *Revue Ed. Phys. Belge* », 27, 1977, pp. 19-48.

PAILLARD J., *The multichanneling of visual cues and the organization of a visually guided response*, dans G.E. Stelmach et J. Requin (Eds), *Tutorial in motor behavior*, Norris Holland, Amsterdam, 1980, pp. 259-279.

- PAILLARD J., *Le pilotage du moteur musculaire*, dans Azemar G. et Ripoll H. (Eds), INSEP Publ., Paris, 1982 (a), pp. 9-35.
- PAILLARD J., *La Psychophysiologie et l'oeuvre de Jean Piaget*, dans « Arch. Psychol. », 50, 1982 (b), pp. 75-86.
- PAILLARD J., *Apraxies and the neurophysiology of motor control.*, dans « Phil. Trans. R. Soc. Lond. », B. 298, 1982 (c), pp. 111-134
- PAILLARD J., *Les sciences du système nerveux et le formalisme du hasard organisationnel*, dans Dumouchel P. et Dupuy J.P. (Eds.), *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Le Seuil, Paris, 1983, pp. 219-237.
- PENFIELD W., *The cerebral cortex and consciousness*, dans « Arch. Neurol. Psychiatr. », 40, 1938, pp. 417-442.
- PHILLIPS C.G., *On integration and teleonomy*, dans « Proc. R. Soc. Lond. », 199, 1977, pp. 415-424.
- PIAGET J., *Biologie et connaissance*, Gallimard, Paris, 1967, 430 p.
- PIAGET J., *Le comportement, moteur de l'évolution*, Gallimard, Paris, 1976, 190p.
- POPPER K.R. et ECCLES J.C., *The Self and its Brain*, Springer Verlag, New York, 1977.
- POWERS W.T., *Behavior : the control of perception*, Aldine Pub.Cy., Chicago, 1973, 296 p.
- PRIGOGINE I., *La thermodynamique de la vie*, dans « La Recherche », 24, 1972, pp. 547-562.
- PRIGOGINE I. et STENGERS I., *La nouvelle alliance. métamorphoses de la Science*, Gallimard, Paris, 1979, 302 p.
- RAKIC P., *Mode of cell migration to the superficial layers of fetal monkey neocortex*, dans « J. Comp. Neurol. », 145, 1972, pp. 61-84.
- RAUSCHECKER J.P. et SINGER W., *The effects of early visual cortex and their possible explanation by Hebb synapses*, dans « J. Physiol. », 310, visual experience on the cat, Londres, 1981, pp. 215-239.
- ROBINSON D., *Properties of the diffuse thalamocortical system and human personality : a direct test of Pavlovian-Eysenckian theory*, dans « Person. Individ. Diff. », 3, 1982, pp. 1-16.
- ROUGEUL-BUSER A., *Les mécanismes qui sous-tendent l'attention*, Courrier du C.N.R.S., 55-56, 1984, pp. 55-57
- ROUTENBERG A., *Le système de récompense du cerveau*, dans « Sc. Amer. », 239, 1978, pp. 154-165.
- SAMUELS I., *Reticular mechanisms and behaviour*, dans « Psychol. Bull. », 56, 1959 pp. 1-25.
- SHERRINGTON C.S., *The integrative action of the nervous system*, Scribner's, New York, 1906

SPERRY R.W., *Brain bisection and mechanisms of consciousness*, dans Eccles J.C. (Ed.), *Brain and Conscious experience*, Springer Verlag, 1966, pp. 298-313.

SPERRY R.W., *An emergent theory of consciousness*, dans « Psychol. Rev. », 76, 1968, pp. 532-536.

SPERRY R.W., *Mind-Brain interactionism : mentalism, yes; dualism, no*, dans « Neuroscience », 5, 1980, pp. 195-206.

STEIN P.S.G., *Motor systems with specific reference to the control of locomotion*, dans « Ann. Rev. Neurosc. », 1, 1978, pp. 61-81.

SZENTAGOTHAI J., *The « module concept » in cerebral cortex architecture*, dans « Brain Res. », 95, 1975, pp. 475-496.

SZENTAGOTHAI J., *Downward causation* dans « Ann. Rev. Neurosc. », 7, 1984, pp. 1-11.

THOM R., *Stabilité structurelle et morphogénèse. Essai d'une théorie générale des modèles*, Benjamin Inc. Reading Mass., 1972, 362 p.

VARELA F.J., *Principles of biological autonomy*, North Holland, New York, 1979, 303p.

WEISS P., *Self-differentiation of basic patterns of coordination*, dans « Comp. Psychol. Monogr. », 77, 1961, pp. 1-96.