

ADDITIF AUX ACTES DU FORUM
ADDENDUM TO THE FORUM PROCEEDINGS

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET NEUROSCIENCES
ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NEUROSCIENCE

Jeudi 6 juin 1985 / *Thursday June 6, 1985*

J. PAILLARD, Institut de Neurophysiologie et Psychophysiologie, Marseille

Contrastes entre les modalités de traitement de l'information par le cerveau et la machine

Contrasting modes of information processing by brain and computer

CESTA Centre d'Études des Systèmes et des Technologies Avancées

1, rue Descartes, 75005 Paris, France ■ Téléphone (1) 634.33.33 ■ Téléc : CESTA 250 795 F

Secrétariat Cognitiva 85 ■ 634.35.01

COGNITIVA 85

Paris, 4-7 Juin 1985

CONTRASTES ENTRE LES MODALITES DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION PAR LE
CERVEAU ET LA MACHINE

CONTRASTING MODES OF INFORMATION PROCESSING BY BRAIN AND COMPUTER

Jacques PAILLARD

Institut de Neurophysiologie & Psychophysiologie – C.N.R.S. – B.P. 71 – 13402 Marseille Cedex 9

RESUME

Le contraste existant entre les modes de traitement de l'information dans le cerveau et les machines relève des spécificités d'organisation et de fonctionnement du cerveau comme élément d'une machine biologique. On ne trouve pas de machines qui s'auto-construisent et s'auto-organisent. Les architectures cérébrales, par contre, sont le résultat d'un auto-assemblage guidé par des programmes génétiques (eux-mêmes sélectionnés au cours d'une longue histoire évolutive) et modulé épigénétiquement (en fonction de l'histoire individuelle du cerveau). Les unités de base de l'organisation cérébrale ne sont pas des composants simples comparables à ceux des ordinateurs. Chaque neurone est une unité systémique complexe non identifiable au "neurone formel" des réseaux de circuits logiques. Il équivaudrait à un microprocesseur alimenté par 10^4 entrées. Le cerveau comprendrait donc près de 10^{11} microprocesseurs interconnectés. Ces chiffres sont fallacieux. Le nombre des entrées non redondantes qui activent un neurone est très inférieur à celui des connexions anatomiquement présentes. Le neurone n'est pas un opérateur universel à la fonction interchangeable dans l'architecture de la machine. C'est un acteur individuel qui a sa morphologie et son histoire propre et sa place attribuée dans la collectivité neuronique dont il est un membre. Les décisions dans le système nerveux ne dépendent pas de la réponse en tout ou rien d'une bascule à seuil. Elles résultent du consensus d'une large population de cellules aux opinions individuelles nuancées, parfois divergentes et constamment soumises à des effets d'ambiance changeante. Cette consultation démocratique prend du temps. C'est le handicap bien connu du cerveau lorsqu'on compare sa rapidité de fonctionnement à celui des machines. En retour, ce mode de fonctionnement confère au cerveau sa surprenante tolérance aux erreurs et au bruit, sa flexibilité adaptative et ses capacités d'auto-organisation créative. La base de connaissance est en permanence actualisée, enrichie et amplifiée grâce tout d'abord au dialogue direct qu'entretient le cerveau avec son environnement par la voie de ses instruments sensorimoteurs mais aussi grâce à la connaissance de lui-même que lui fournissent ses instruments d'auto-évaluation consciente de son propre fonctionnement. Ce sont ces propriétés qui rendent compte de certaines des surprenantes capacités reconnues à l'intelligence humaine et jusqu'ici inégalées par les performances des machines artificielles.

SUMMARY

Contrasts between brain and computer modes of information-processing are clearly related to some basic features that are specific to brain as component of a biological machine. Unlike biological Systems, there is no sense in which machines develop or self-organize. Brain architectures result from a self-assembling process instructed by genetic programs (that have been selected in the course of a long evolutionary history) and modulated by epigenetic processes (that are determined by a unique private history). The basic units of brain organization can not be reduced to simple components comparable to those of machines. Each nervous cell is a complex systemic unit. It cannot be described in terms of the formal neurone of a logical binary network. It is more like a microprocessor which receives 10^4 inputs. Thus, the brain, could, in theory, be envisaged as an assembly of 10^{11} interconnected microprocessors. This figure is in fact deceptive. The number of non redundant inputs activating a neurone is much lower than those of anatomically existing connections. Moreover, each neurone does not operate as a universal microprocessor of which the function should be interchangeable in the architecture of the machine. It acts individually; it has its own distinctive morphology, its individual history and its place in a neural assembly of which it is an interactive member. Decisions in the nervous system do not depend on the response-threshold of a binary switch. They generally result from the consensus of large cell populations of which the individual "opinions" are differently weighted depending of changing ambient. This "democratic" consultation is time-consuming. That is an acknowledged handicap of the brain when compared with high rate computation of machines. In turn, this mode of functioning confers on the brain an astonishing tolerance to errors and resistance to noise, an adaptive flexibility, and the capacity for creative self-organization. Its data base is permanently actuated, enriched and amplified by its direct dialogue, via external sensori-motor loops, with the environment and by its knowledge of himself via its instruments of self-awareness and conscious evaluation. These properties account for some of the surprising capacities of human intelligence, as yet unsurpassed by the performances of artificial machines.

La fascination qu'exerce actuellement l'essor des technologies informatiques avec leur fantastique ambition d'imiter, voire de surpasser, les performances de l'intelligence humaine vient de redonner vigueur à l'idée déjà ancienne qu'une comparaison entre les architectures du cerveau et celles de l'ordinateur pourrait être instructive.

Les productions fonctionnelles du cerveau humain constituent, bien entendu, les modèles de référence qui guident la conception et le perfectionnement des "machines dites à penser". Mais est-il pour autant raisonnable d'attendre de l'architecture de ces machines qu'elle puisse elle-même servir de modèle à notre intelligibilité de l'organisation de la circuiterie cérébrale ? Parallèlement au développement spectaculaire des Sciences de l'intelligence artificielle, les Neurosciences ont, pour leur part, considérablement progressé dans leur connaissance du contenu de la "boîte noire" cérébrale. Elles sont aujourd'hui mieux à même d'évaluer ce qui fait la spécificité et l'originalité des solutions mises en oeuvre dans les machines biologiques pour accroître leur emprise sur l'univers matériel qui les entoure.

1. Une première remarque s'impose, dès l'abord : la machine artificielle est le résultat d'une fabrication issue du cerveau de son concepteur ; l'organisme biologique est, quant à lui, le résultat d'un auto-assemblage programmé, dont le plan de construction résulte d'un long processus d'évolution sélective qui a duré des millions d'années. Il a conservé dans ses mémoires génétiques les solutions reconnues satisfaisantes, mais non nécessairement optimales, pour assurer la survie de l'organisme dans un environnement hostile. S'agissant du cerveau et de son étonnant développement chez les organismes supérieurs, la neurobiologie moderne nous apprendra que son architecture n'est qu'en partie seulement dépendante de son programme de construction génétique et qu'elle est largement modulée par l'expérience que procure au cerveau l'incessant dialogue qu'il entretient avec l'environnement et avec le corps qu'il habite au cours de son développement et tout au long de sa vie.

2. Un second point doit retenir l'attention. Il concerne l'échelle dimensionnelle. Comparativement à la miniaturisation déjà surprenante des composants de la technologie moderne, celle de la machinerie biologique est encore beaucoup plus poussée puisqu'elle atteint l'échelle du micron. Aussi, les prouesses instrumentales réalisées par la neurobiologie pour analyser le fonctionnement d'une telle machine doivent-elles être ici appréciées à leur juste valeur.

Cet "ordinateur humide" que serait le cerveau se présente, en fait, comme deux masses gélatineuses accolées, irrégulièrement marquées à leur surface par de profonds sillons. Elles occupent tout le volume de la boîte crânienne. Leur surface totale, estimée à 4.000 cm², est recouverte d'une mince écorce de 2 mm d'épaisseur qui épouse les sillons et qui, si on la déplaçait, correspondrait à une pièce d'étoffe carrée de 63 cm de côté qu'il faudrait froisser pour lui faire prendre place dans la boîte crânienne de dimension plus réduite. Ce qui explique la présence des nombreux sillons délimitant les circonvolutions qui servent au repérage des grands secteurs fonctionnels des hémisphères cérébraux. Si l'on examine au microscope un fragment de cette écorce on décèle sur sa coupe une myriade de petits points qui sont, en fait, les

corps des neurones. Le neurone constitue l'unité cellulaire du tissu nerveux, autrement dit le composant de base de la machine cérébrale. Ces composants sont connectés entre eux par un dense réseau de câbles conducteurs. Ils vont donc constituer les noeuds d'un réseau dont les fibres constituent les mailles. C'est d'abord au niveau de ces noeuds (qui ont en moyenne 20 à 30 microns de diamètre) que doit se placer le physiologiste pour étudier la nature des informations qui circulent dans le réseau. C'est aussi le plan de câblage du réseau qui doit être déchiffré pour inférer la logique distributive de cette circulation. C'est enfin le mode de transmission de l'information d'un neurone au suivant qui retient l'attention pour comprendre la nature des interactions qui s'exercent entre les éléments composants et celle des opérations dont chaque neurone est le siège.

3. Ces trois problèmes résument les trois cibles principales de la neurobiologie moderne qui dispose d'outils toujours plus performants pour approcher chacune d'elles au double plan structural et fonctionnel.

3.1. S'agissant du neurone lui-même, on peut le considérer comme une unité fonctionnelle réalisant un traitement des informations convergentes qu'il reçoit sur ses surfaces de réception et fournissant le résultat de son calcul sous forme d'un message de sortie qui sera conduit à des adresses variables, spécifiées dans l'architecture du réseau. A l'aide de microélectrodes implantées dans le corps cellulaire le neurophysiologiste peut ici analyser les transformations qui opèrent sur les messages d'entrées et leur chronologie. Sans entrer ici dans le détail, nous retiendrons essentiellement que le fonctionnement du neurone apparaît non comme la bascule d'un relais binaire mais comme un véritable "ultramicroprocesseur" dont les fonctions vont varier suivant la morphologie de la cellule et les propriétés de sa membrane. Ce qui frappe ici c'est la variété de ces "microprocesseurs" et donc probablement la spécificité des opérations que chacun d'eux réalise et par conséquent le contraste avec la simplicité et la banalité du "neurone formel" conçu par des théoriciens des réseaux de circuits logiques.

Ainsi, contrairement à ce que l'on trouve dans la démarche analytique classique, l'analyse du Biologiste ne réduit pas le complexe à des éléments plus simples mais il découvre à chaque niveau de sa réduction un nouveau monde de complexité auquel il se trouve confronté. Le neurone va en effet apparaître comme un système biologique autonome avec sa machinerie interne, ses circuits métaboliques qui relèvent de la même logique d'organisation spécifique propre à toute unité de système vivant. Toute unité systémique vivante doit, en effet, être considérée, à quelque niveau d'organisation qu'on la considère, dans son statut de stationnarité de non équilibre qui, pour se maintenir, doit activement lutter contre la désorganisation thermodynamique qui la menace. Nous sommes donc très loin des composants élémentaires stables de la machine artificielle.

Il en résulte que le comportement des groupements de neurones ne peut pas être directement déduit des comportements individuels de chacun d'eux. Comme dans les groupes humains il y a des phénomènes d'interdépendance, d'interactions individuelles, d'entraînement collectif, de conflits d'influence et de décision majoritaire.

Il y a une sociologie du neurone qui présente les mêmes difficultés d'analyse et de prévision que les phénomènes sociaux humains. C'est une des difficultés que rencontrent actuellement les Neurobiologistes pour interpréter les activités qu'ils recueillent à partir de neurones étudiés isolément où les effets de groupe et de contexte "sociologique" jouent un rôle important et encore mal maîtrisé. C'est une difficulté qu'on ne rencontre pas, semble-t-il, avec les éléments de l'ordinateur dont l'indépendance fonctionnelle est préservée par construction.

3.2. Si nous considérons maintenant le plan de câblage, la neuroanatomie moderne vient de disposer de nouvelles techniques utilisant diverses classes de marqueurs métaboliques qui permettent un traçage précis des voies de liaison des réseaux locaux et le décryptage systématique de la circuiterie interneuronale. Ce que nous révèlent ces études c'est l'extrême précision de la connectivité interne, mais aussi et surtout sa mutabilité, sa plasticité au cours de la croissance du cerveau et un curieux principe de sélection darwinienne qui préside à la consolidation des circuits fonctionnels et à la disparition des connexions inutiles. Nous avons, là encore, une différence fondamentale avec la circuiterie rigide et stable des processeurs artificiels.

3.3. S'agissant enfin des structures d'interface qui connectent les neurones entre eux, ce qu'on appelle les "synapses", et qui constituent le lieu privilégié des micro-événements interactionnels, leur étude structurale et fonctionnelle, aujourd'hui très avancée, nous a révélé la subtilité des mécanismes neurochimiques qui sous-tendent et modulent leur capacité de transmission. De la répartition topographique de ces synapses sur les surfaces membranaires, de la nature des médiateurs chimiques qu'elles sécrètent, des caractéristiques moléculaires de la membrane post-synaptique va dépendre un jeu complexe d'addition, de soustraction, de divisions, d'intégration, de dérivation qui font du neurone récepteur un véritable microprocesseur local aux fonctions variables suivant la morphologie du neurone et la place qu'il occupe dans la topographie du réseau.

L'étude des fonctions synaptiques nous a également révélé la modifiabilité de leur pouvoir de transmission et l'explication au niveau moléculaire de leur labilité conformationnelle initiale et de leur stabilisation ultérieure au cours du développement. Leur sensibilité extrême aux effets de l'usage et du non-usage les désigne comme l'instrument privilégié de l'inscription en mémoire de l'histoire des dialogues qu'a entretenus le système nerveux avec son environnement. C'est à cette propriété que l'on peut rapporter l'étonnante capacité du système nerveux à détecter les configurations stables ou régulières dans le flux d'informations qui lui parvient de son environnement, autrement dit à reconnaître les structures invariantes de cet environnement. Or on sait qu'au niveau du neurone c'est la covariance des entrées qui contribue précisément à accroître le pouvoir de transmission des synapses coactives en réduisant celui des synapses aux activités déphasées. Le neurone, ou les ensembles de neurones, acquièrent ainsi la propriété de ne répondre qu'à certaines configurations d'entrées covariantes qui correspondent à la prédisposition acquise de leurs structures synaptiques d'accueil, les dotant ainsi d'une véritable fonction de "reconnaissance de forme".

Là encore, il nous faut opposer l'extrême difficulté que pose à la programmation d'un ordinateur une opération de reconnaissance de forme à l'économie des moyens mis en oeuvre par le système nerveux pour réaliser, grâce à la propriété plastique de ses structures de connexion, des opérations d'extraction d'invariance relativement complexes si on devait les formaliser en termes logico-mathématiques. On touche ici du doigt l'une des originalités fondamentales de la machine biologique. Lorsqu'on compare ses principes de fonctionnement à ceux des machines artificielles, qui réside dans son utilisation systématique de la dimension historique des événements qu'elle traite grâce à la propriété plastique de ses structures de connectivité. C'est une originalité qu'elle paye par ailleurs, du fait des contraintes temporelles que lui impose ce type de fonctionnement, par la surprenante lenteur des opérations qu'elle réalise comparée à la vitesse d'exécution des calculateurs physiques.

4. Un autre aspect est souvent évoqué lorsqu'on compare le cerveau à l'ordinateur, c'est celui qui concerne la dimension quantitative du problème. La capacité de traitement d'un ordinateur est considérée comme fonction du nombre de ses composants.

4.1. Or le nombre des composants de la machine nerveuse est énorme. L'estimation classique fournit le chiffre de 10^{11} neurones pour ce qui concerne le seul manteau cortical dont nous avons vu la minceur. Mais nous savons que le fonctionnement du cerveau ne se limite pas aux seules opérations qui prennent place à l'intérieur de la fine écorce cérébrale. Nous savons qu'il implique la participation permanente des structures sous-jacentes et des nombreuses boucles d'interactions qui associent le néocortex aux étages sous-corticaux du traitement de l'information. Dans ces étages on trouve des structures volumineuses (cortex limbique, thalamus, ganglions de la base, cervelet, tronc cérébral) qui contiennent également d'énormes quantités de neurones. Le nombre des éléments cellulaires que contiendrait la totalité d'un système nerveux évolué comme celui de l'Homme est donc considérablement plus élevé que celui des composants des ordinateurs actuellement les plus puissants et même de ceux que l'on peut espérer construire dans l'avenir.

Si l'on estime par ailleurs le nombre des contacts synaptiques identifiables sur les membranes d'un seul neurone c'est un chiffre de 10^4 qui est avancé. On estime, par ailleurs, qu'un neurone peut recevoir environ 10^3 informations d'origine différente. Ces chiffres peuvent impressionner, surtout si l'on veut bien considérer que chacun des noeuds du réseau est ici assimilable à un élément de calcul et non à un simple relais binaire. Doit-on pour autant en conclure que le cerveau disposerait d'une capacité de traitement incommensurable à celle des ordinateurs les plus complexes ?

4.2. Il serait imprudent de céder au vertige des chiffres.

Considérons tout d'abord le nombre des neurones. Nous avons vu que les machines biologiques doivent, en fait, pour s'adapter à des contraintes nouvelles, surmonter les imperfections inhérentes au "bricolage" auquel les oblige la variété des éléments présents dans leur répertoire et hérités de leur longue histoire évolutive.

C'est en multipliant la redondance des circuits fonctionnels qu'elles accroissent la fiabilité de leurs performances. Elles ne peuvent pas compter non plus sur la fiabilité de fonctionnement des neurones pris isolément, ni sur la précision absolue des adresses. Ce sont aussi des machines "bruyantes". Plutôt que de confier les pouvoirs de décisions à un seul élément parfaitement fiable (comme c'est le cas je crois dans les machines artificielles) elles multiplient le nombre des neurones chargés de la même fonction. Chacun d'eux a sa personnalité propre et peut avoir des probabilités de réponse différente à une même entrée. C'est, dès lors, la réponse majoritaire de l'ensemble qui finalement aboutit à une décision en oui ou non. On a pu montrer comment un comportement collectif de cette nature peut parfaitement simuler une bascule à seuil (voir figure 1). Mais là où un relais suffit dans la technologie électronique il faut dans le cerveau peut être un petit millier de neurones (et aussi un peu plus de temps) pour réaliser la même fonction.

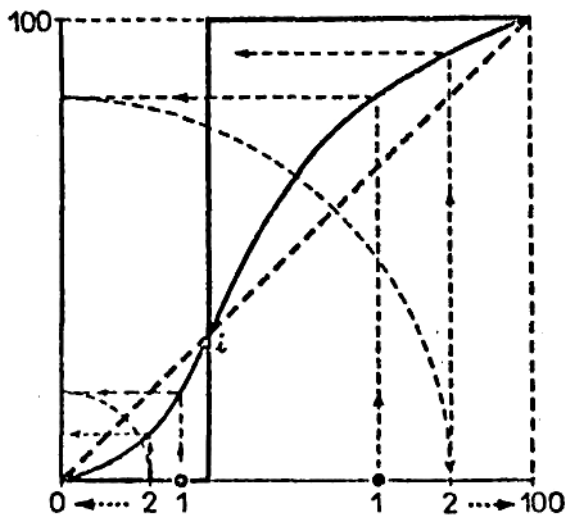


Figure 1. Graphique destiné à faire comprendre comment une "fonction de transfert" peut dans un réseau de neurones passer d'une forme sigmoïde à une fonction d'échelon lorsque plusieurs barrières monosynaptiques se présentent successivement en série au flux de signaux. Ces derniers tendront soit à s'atténuer jusqu'à disparaître, soit à s'accroître jusqu'à atteindre leur régime maximum réalisant l'équivalent d'une bascule binaire (d'après Fessard, 1969).

Il en est de même en ce qui concerne le nombre des connexions. Le chiffre avancé de 10^4 connexions par neurone est directement tiré des données structurales. Or nous avons vu que le pouvoir de transmission des synapses était variable et il est à peu près certain qu'un grand nombre d'entre elles peuvent ne pas avoir été consolidées par le processus de sélection et restent de ce fait anatomiquement présentes mais non fonctionnelles.

Il est donc très probablement incorrect de raisonner sur le grand nombre d'éléments existant dans le système nerveux en les assimilant aux éléments fiables et fonctionnels des machines artificielles.

4.3. Une telle complexité semblait défier l'espoir, actuel ou même futur, de pouvoir maîtriser la description exhaustive de la connectivité interne de cette organisation "hypercomplexe" au sens de Von Neuman. Ce qui explique la faveur qu'ont connu les modèles de réseaux stochastiques auprès des neurobiologistes. Mais la découverte des architectures modulaires a récemment ouvert de nouvelles perspectives. En effet, grâce aux nouvelles techniques dont dispose la Neurobiologie pour l'exploration de la microcircuiture nerveuse et la caractérisation de ses modes de fonctionnement, c'est au groupement modulaire d'ensembles neuronaux que l'on semble aujourd'hui confronté, au moins à un certain niveau de réduction, pour comprendre la logique d'organisation de la machine nerveuse. Sans entrer ici dans le détail des architectures modulaires de plus en plus nombreuses à être décrites aux étages rigidelement câblés du tronc cérébral et de la moelle, nous retiendrons la transformation récente et assez inattendue de l'image que nous pouvons avoir de l'organisation du manteau cortical lui-même.

Les données électrophysiologiques, histologiques et embryologiques convergent actuellement pour concevoir le manteau cortical comme composé de la juxtaposition d'unités de traitement élémentaires représentées par des minicolonnes verticales de 30 microns de diamètre et comprenant chez tous les vertébrés un nombre constant de 110 neurones. Ces unités seraient groupées en faisceaux comprenant un nombre plus ou moins important de minicolonnes (1.000 en moyenne) suivant les différentes régions du cortex. Ces faisceaux constituent des colonnes fonctionnelles dont les diamètres peuvent varier de 300 à 1000 microns (voir figure 2). On estime actuellement le nombre total des minicolonnes à $600 \cdot 10^6$ et celui des unités de traitement qui constituent les colonnes fonctionnelles à $600 \cdot 10^3$ dans le cerveau humain. Le cerveau apparaîtrait ainsi comme une mosaïque de colonnes verticales à peu près toutes semblables aux premiers stades du développement. La seule différence entre le cerveau de l'Homme et ceux des autres vertébrés tiendrait donc au plus grand nombre des éléments redondants dont il dispose au départ pour constituer l'appareil de traitement cérébral.

4.4. On conçoit, dès lors, que si l'énorme complexité représentée par l'enchevêtrement d'un câblage de milliards de connexions peut être réduite à un assemblage d'unités répétitives de 110 neurones, l'espoir d'une possibilité de décryptage de la microcircuiture interne de ces colonnes est désormais permis. Bien que la difficulté en reste considérable, l'atteinte d'un tel objectif ne paraît pas hors de portée. En outre, l'idée qu'une même logique interne pourrait présider au fonctionnement de ces unités de base toutes semblables stimule l'ardeur des chercheurs sur cette nouvelle cible de l'exploration cérébrale. Ce serait alors la seule configuration des connexions extrinsèques (sélection des entrées) qui spécifierait la fonction de sortie de la colonne. Mais, comme nous l'avons vu, l'hypothèse d'une variété finie de ces unités

basées sur des différences de morphologie cellulaire et de circuiterie interne ne peut être écartée. Elle pourrait alors offrir les bases d'un alphabet de fonctions opératoires. Elle ouvrirait ainsi le champ à une recherche de la combinatoire modulable des éléments de cet alphabet conditionnant l'expression des diverses fonctions cérébrales connues. Ajoutons que cette conception d'une délocalisation de fonction implique aussi une délocalisation du "compartiment mémoire" du cerveau au niveau de chacune des colonnes. C'est sur cette perspective microlocalisationniste de fonctions opératoires identifiables que débouche finalement la recherche contemporaine.

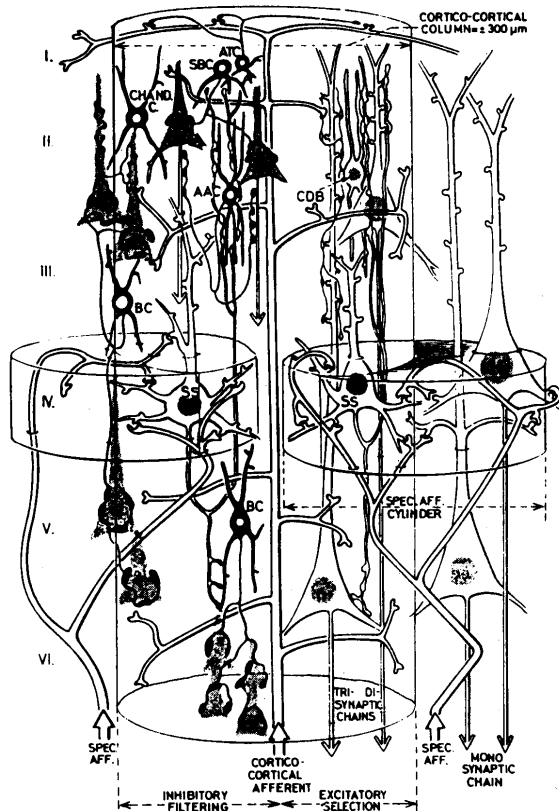


Figure 2. Diagramme simplifié des circuits internes d'une colonne corticale de 300 microns de diamètre (d'après Szentagothai, 1979).

5. Contribuera-t-elle pour autant à rapprocher nos conceptions de l'organisation cérébrale des modèles que nous en donnons aujourd'hui les machines artificielles ? Il est permis d'en douter si l'on en juge déjà par la diversité des solutions que les myriades de formes vivantes qui peuplent la biosphère ont inventées pour satisfaire la même logique unitaire d'organisation qui fait la spécificité du vivant par rapport à l'ordre matériel inanimé. En irait-il différemment, de l'organe producteur de l'intelligence humaine qui cumule dans sa structure et ses modes de fonctionnement toutes les vieilles recettes héritées de la lutte impitoyable qu'ont menée les systèmes vivants depuis des millions d'années pour s'affranchir des contraintes d'un environnement hostile

et y survivre. La souplesse adaptative et la surprenante fiabilité que confère à ces machines vivantes leur statut de "bricolage" génial, pour reprendre une expression de François Jacob, nous fait mesurer la distance qui sépare le vol de l'albatros et celui du Concorde comme elle sépare sans doute l'intelligence humaine de l'intelligence artificielle, du point de vue des moyens mis en oeuvre par chacune de ces machines pour réaliser des fonctions similaires.

On ne peut nier cependant le profit que peut tirer l'intelligence artificielle d'une meilleure connaissance des procédures algorithmiques inventées par la vie. De ce point de vue les caractéristiques de sortie du système global, autrement dit celles des activités cognitives du cerveau humain, lui seront certainement plus utiles à connaître que celles des mécanismes nerveux qui les réalisent. Les processus de traitement mis en oeuvre par le système nerveux pour produire ces activités reposent, comme nous l'avons vu, sur des principes entièrement originaux spécifiques à la machinerie biologique et dont l'intérêt pour la conception des machines restera sans doute limité.

Pour des raisons identiques, le profit que la Biologie pourra, à terme, tirer des modèles de machines artificielles pour mieux comprendre les organisations vivantes peut ne pas paraître évident. On peut penser toutefois que l'identification de la logique des opérations fonctionnelles "implémentée" dans les machines est susceptible d'orienter la recherche des partitions fonctionnelles qui correspondent aux groupements modulaires hiérarchisés que nous a révélés l'étude de la microcircuiterie des architectures nerveuses.

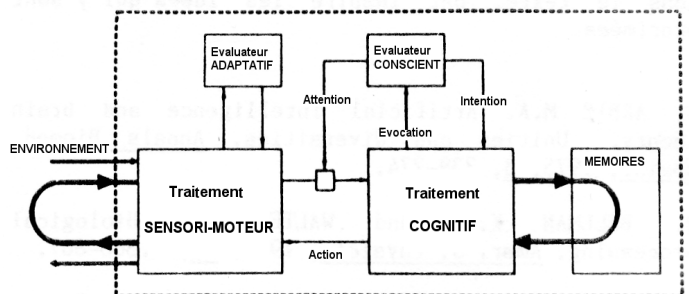


Figure 3. Schéma simplifié montrant l'articulation des compartiments sensorimoteurs et cognitifs. Le compartiment sensorimoteur peut être sollicité de façon réflexe, mais il constitue généralement l'instrument d'une boucle motosensorielle d'interrogation de l'environnement. Il bénéficie de capacités auto-adaptatives. Le compartiment cognitif dont l'entrée est contrôlée par les processus attentionnels dialogue directement avec le modèle de l'environnement représenté dans ses mémoires. Il est sous le contrôle d'un évaluateur conscient, instrument des évocations perceptives et des initiatives motrices (d'après Paillard, 1985).

Pouvons-nous enfin attendre de ce va et vient conceptuel et technologique qu'il contribue à réduire la distance toujours intuitivement présente qui sépare le cerveau des machines. Les machines nous semblent encore dépourvues des potentialités d'adaptation évolutive que confèrent aux êtres vivants les ressources d'un dialogue sensori-moteur avec, l'environnement. Ce dialogue, d'abord au service de la construction et du maintien de sa machine auto-poïétique pour assurer ses besoins énergétiques, deviendra aussi l'instrument de construction puis d'enrichissement d'un appareil cognitif capable de dialoguer à son tour avec la représentation mentale interne de son environnement mais aussi de lui-même qu'il constitue dans ses mémoires (voir figure 3). C'est précisément de cette connaissance de soi qu'émerge cette expérience singulière que nous qualifions de consciente qui traduit l'existence d'un nouvel instrument de régulation et de contrôle supérieur, source d'anticipation et de décision comme d'indécision, d'intuition, d'imagination et de création dont les machines artificielles ne peuvent, à ce jour, nous offrir que des simulations très imparfaites. Peut-on ici situer la frontière qui continue et continuera sans doute encore longtemps de séparer les domaines de l'intelligence artificielle et de l'intelligence humaine ? Avec ses millions d'années d'expérience derrière elle, la vie a tout de même une avance plus que confortable et seul un ordinateur de conception biotechnologique capable d'asservir les savoir-faire des organisations vivantes pourrait paraître en mesure de relever un tel défi. On nous accordera bien de pouvoir un peu rêver tant que ce privilège ne nous est pas encore contesté par les machines.

Bibliographie

Les travaux suivants, non explicitement référencés dans le texte, ont inspiré les idées qui y sont exprimées.

1. ARBIB M.A. Artificial intelligence and brain theory. Unities and diversities. *Annals Biomed. Engin.*, 1975, 3, 238-274.
2. BELLMAN K.L. and WALTER D.O. Biological processing. *Amer. J. Physiol.*, 1984, 15, R. 860-867.
3. CHANGEUX J.P. *L'Homme neuronal*. Fayard, Paris, 1983, 419 p.
4. FESSARD A. Les problèmes du code nerveux. In: *Theoretical Physics and Biology*. North-Holland, Amsterdam, 1969, 230-245.
5. FODOR J.A. *The modularity of mind*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1983.
6. MOUNTCASTLE V. An organizing principle for cerebral function: the unit module and the distributed system. In: EDELMAN G. and MOUNTCASTLE V. (eds). *The mindfull brain*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1978, 7-50.
7. PAILLARD J. Système nerveux et fonction d'organisation. In: PIAGET J., BRONCKART J.P., MOUNOUD M. (eds). *La Psychologie*, Encyclopédie de la Pléiade, Gallimard Paris, (sous presse).

8. PAILLARD J. Les sciences du système nerveux et le formalisme du hasard organisationnel. In : DUMOUCHEL P. et DUPUY J.P. (eds). *L'auto-organisation de la Physique au Politique*. Colloque de Cerisy. Seuil, Paris, 1983, 219-237.
9. PAILLARD J. L'encodage sensori-moteur et cognitif de l'expérience spatiale. *Comportements*, 1985. (sous presse).
10. PHILLIPS C.G., ZEKI S. and BARLOW H.B. Localization of function in the cerebral cortex. *Brain*, 1984, 107, 328-361.
11. SZENTAGOTHAI J. Local neuron circuits of the neo-cortex. In : SCHMITT F.O. and WORDEN F.G. (eds). *The Neurosciences. Fourth Study Progr.* MIT Pres, Cambridge, Mass., 1979, chap. 23, 399-405.