

Un système multi-agents neuronal : vers des systèmes d'information épigénétiques

Joël COLLOC

Maître de conférences à l'IAE,
Université Jean Moulin Lyon 3

RÉSUMÉ

L'évolution des logiciels est limitée par la nature symbolique des ordinateurs. Pourtant, le cerveau n'est pas une machine symbolique, il est capable de s'adapter aux modifications d'environnement. Le cerveau est en perpétuelle construction, il modifie sans cesse sa structure pour s'adapter au monde qu'il perçoit et aux événements de la vie. Nous examinons les possibilités d'une voie de recherche traditionnellement considérée comme une impasse : comment doter les ordinateurs de capacités de se modifier eux-mêmes. Cet article propose un système multi-agents neuronal fondé sur des travaux récents concernant les neurosciences et la génétique. Il emprunte au système nerveux certaines facultés d'adaptation qui ne sont pas présentes dans les réseaux de neurones classiques. Les agents neurones réactifs sont dotés d'opérateurs leur permettant de changer non seulement leurs paramètres mais aussi leur mode de communication selon la fréquence et l'intensité des stimuli qu'ils reçoivent.

Mots-clés : Systèmes multi-agents, Plasticité neuronale, Epigénèse du système nerveux, Evolution temporelle, Auto-adaptation.

ABSTRACT

The software evolution is constrained by the symbolic nature of computers. Nevertheless, the brain is not a symbolic machine, it is able to adapt itself to the environment modifications. The brain is continually building up, it modifies its own structure to adapt itself to the perceived world and to the life events. We examine the possibilities of a research way which is usually considered as a dead end: how to provide computers with the ability to modify themselves. This article proposes a neuronal multi-agent system which relies on recent works in neurosciences and genetic. It borrows from the nervous system some adaptation facilities which are not currently included in usual neural networks. Neural reactive agents are provided with operators which are used not only to tune-up some parameters but to change radically the communication mode according to the frequency and the intensity of their stimulation inputs.

Key-words: Multi-agent systems, Neuronal plasticity, Nervous system epigenesis, Temporal evolution, Auto-adaptation.

INTRODUCTION

La plupart des recherches en systèmes d'information cherchent à améliorer la capacité des modèles à représenter notre environnement, en continuant le changement, afin d'en obtenir une image la plus fidèle possible. Bien que des progrès réels aient été réalisés pour améliorer la pérennité des systèmes d'information et la réutilisation des composants logiciels, ces techniques trouvent leurs limites dans la nature symbolique des ordinateurs. En revanche, l'Homme est capable de changer continuellement le mode de traitement de son information, il s'adapte à son environnement, il modifie sans cesse ses schémas de pensée, abandonnant ceux qui deviennent inefficaces au profit de ceux qui apparaissent plus pertinents. Cette dynamique de la pensée est bien le centre de la problématique que nous allons aborder. Cette adaptation de la pensée procure à notre système nerveux une faculté que ne possèdent pas les ordinateurs : l'imagination. Comment doter les ordinateurs de capacités similaires ?

Cette voie de recherche, traditionnellement considérée comme une impasse par les informaticiens (McCarthy, 1971), les biologistes (Eccles, 1997) et les philosophes (Dreyfus, 1984) consiste à faire évoluer la nature même des ordinateurs et à les doter de capacités d'auto-adaptation.

Afin d'atteindre ce but, il est nécessaire d'étudier ce qui donne au cerveau cette capacité si spéciale. En quoi diffère-t-il d'un ordinateur dans le traitement de l'information ?

Toutes les machines que nous utilisons sont fondées sur le principe de la machine de Turing établie dans la thèse de Church-Tu-

ring. Cette thèse spécifie que toute fonction programmable peut l'être avec une machine de Turing. Cette machine est constituée d'un ruban initialisé avec des zéros et de l'ensemble des symboles utilisables fixé une fois pour toutes $\{(\cdot), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \rightarrow, D, G, E\}$ où D signifie aller à droite, G aller à gauche et E écrire. Les opérations réalisées peuvent être exprimées à l'aide d'un graphe qui représente en fait un automate d'états finis spécifiant les transitions possibles. Lorsque le problème est décidable, la machine de Turing s'arrête dans un état stable ; dans le cas contraire, le problème est indécidable et la machine, munie d'une expression formelle établie selon le langage mentionné ci-dessus, évolue éternellement sans parvenir à un état satisfaisant. La machine de Turing ainsi obtenue est "infinie" (Delahaye, 1993).

En revanche, l'ensemble d'opérateurs du cerveau humain n'est pas délimité par un ensemble, il ne s'agit pas d'une machine symbolique. Le cerveau est capable de créer de nouveaux opérateurs pour appréhender le monde qui est perçu. Pourtant, on peut souligner le paradoxe suivant : le cerveau est le résultat de la division d'une seule cellule comportant un code génétique exprimé par un langage de base plus simple que celui employé par la machine de Turing puisque l'ADN ne comporte que quatre symboles : les acides aminés Adénine, Thymine, Cytosine, Guanine $\{A;T;C;G\}$, certes, combinés un grand nombre de fois. Ces acides aminés forment une double hélice dont la taille est tout de même finie. On peut en déduire qu'il existe nécessairement un nombre fini de cerveaux différents. En effet, même si le nombre de combinaisons obtenues

est très grand, il est fini. Comment la structure d'un organe, dont les capacités d'évolution semblent illimitées, peut-elle être générée dans un langage dont le nombre de symboles est plutôt faible (quatre) alors que le nombre de nucléotides semble stable ? Nous savons que les vrais jumeaux ont un cerveau différent, alors qu'ils disposent du même patrimoine génétique. Il est ainsi montré que la vie et l'environnement programment tout autant l'évolution du cerveau que le matériel génétique. Cette évolution est fondée sur les capacités de plasticité neuronale du cerveau humain. En conséquence, si l'on désire doter les ordinateurs de capacités d'adaptation à l'environnement, il est nécessaire de créer des dispositifs de perception (de nombreux auteurs traitent cet aspect qui ne constitue pas le propos de ce travail) et des moyens de faire évoluer la structure des ordinateurs au gré de l'environnement. Des chercheurs s'intéressant à l'évolution de composants électroniques, essaient de doter les ordinateurs de capacités d'évolution du jeu d'instructions. Ils nous préparent la future génération d'ordinateurs et il en découlera une nouvelle manière de concevoir les systèmes d'information (Tempesti, 1998 ; Sekanina, 2000).

Certains ordinateurs parallèles possèdent des propriétés intéressantes de distribution des tâches et de neuromimétisme (Möller et Paschke, 1996) mais ils ne semblent pas dotés de capacités de modification de leur jeu de symboles. Ainsi, les capacités d'évolution de la structure du système semblent plus importantes que son mode de codage.

La différence la plus fondamentale est que le cerveau humain

n'est pas de nature symbolique. En effet, son fonctionnement ne repose pas sur un mécanisme pré-établi qui lui permettrait de comprendre et d'utiliser un ensemble de symboles pré-programmés et donc figés, comme c'est le cas pour un ordinateur. Par contre, il est susceptible de développer des mécanismes capables de créer ses propres symboles dans le but de simplifier la mémorisation des événements perçus dans son environnement. Cette nuance est primordiale car une ambiguïté a longtemps été entretenue par les linguistes comme Fodor qui ont confondu le résultat (le langage) avec le processus qui l'a secrété (la maturation cérébrale). Le processus de maturation cérébrale est le fruit de millions d'années d'évolution. Le langage est certes une fonction importante, mais il ne traduit que bien imparfaitement la pensée. Le "mentalais" proposé par Fodor n'est qu'une auto-verbalisation interne, parfois à haute voix (afin de mettre en œuvre la boucle phonologique) et de renforcer la mémorisation des faits importants pour aborder un problème donné. Ainsi, la verbalisation favorise la pensée mais n'est pas la pensée elle-même.

Il est facile de montrer que le langage parlé, qui exploite un système de symboles (d'ailleurs propre à chaque individu), ne se met en place correctement que si les organes de perception (notamment l'ouïe) se sont bien développés durant l'embryogenèse et si les stimuli de l'environnement et de la boucle phonologique (Baddeley, 1990) ont donné lieu à une maturation des voies nerveuses nécessaires à leur bon fonctionnement.

Quant à la capacité à communiquer avec autrui, il ne faut pas

l'oublier, elle ne survient que plus tard. Elle provient d'un long apprentissage (en partie scolaire) qui conduit, par des ajustements successifs, à construire un sous-ensemble de symboles commun avec celui des autres. C'est une condition indispensable pour vivre en société. Mais, nous vivons tous chaque jour des situations d'incompréhension, des malentendus qui montrent bien les limites du processus de mise en place du langage et de son utilisation.

L'étude de la maturation des voies sensorielles est donc essentielle. Carla Shatz montre que la maturation du cerveau ne s'arrête pas à la fin de l'embryogenèse mais que celle-ci se poursuit après la naissance. En effet, D. Hubel et T. Wiesel ont montré que la formation correcte des voies visuelles était subordonnée à la présence des stimulations rétiniennes. Une étude menée chez le chat a montré que lorsque ces stimulations sont inexistantes sur un des yeux (par exemple en raison d'une cataracte), on observe une perturbation de la formation des colonnes de dominance oculaires correspondant à l'œil atteint. Ainsi, dans la couche IV du cortex, les neurones cibles des influx provenant du corps genouillé latéral correspondant à cet œil sont anormalement petits. La formation de cette voie n'a lieu que durant une période critique, de sorte que si cette maturation ne s'est pas produite à ce moment là, elle n'aura jamais lieu. A l'inverse, la cataracte chez l'adulte est sans effet car la période critique est terminée et le câblage du cerveau ne peut plus être perturbé (Shatz, 1992). Des modèles informatiques fondés sur des mécanismes statistiques et une fonction d'énergie ont été proposés

pour modéliser la plasticité neuronale des colonnes de dominance oculaires (Elliott et al., 1996).

Des méthodes thérapeutiques appliquées à des enfants présentant une déficience neurologique à la naissance reposent sur une hyper-stimulation en espérant ainsi provoquer l'établissement de réseaux neuronaux de suppléance. Toutefois, leur efficacité est controversée, peut-être en raison de la période critique dont nous venons de parler.

On assiste donc à une adaptation progressive des organes des sens et des dispositifs de gestion de l'information du système nerveux à l'environnement. Les chauves-souris sont aveugles car elles vivent le plus souvent dans le noir. Elles ont développé, à la place de la vision, un dispositif de guidage assez similaire au radar mais utilisant des signaux ultrasoniques. Ceci montre que l'effet de l'environnement est primordial dans la maturation du système nerveux central.

L'ordinateur ne dispose pas de connaissances de sens commun. Il ne dispose que d'un système d'exploitation qui lui fournit un accès à l'environnement, par l'intermédiaire d'un système de symboles figé appelé jeu d'instructions. Il ne possède pas de conscience collective. Toutes les données ou connaissances qui lui sont fournies sont codées d'une manière plus ou moins simple par un informaticien. Le cerveau humain est le résultat de plusieurs centaines de millions d'années d'évolution, c'est-à-dire de l'interaction avec l'environnement de milliards de milliards d'individus.

La question qui est donc posée est la suivante : comment ren-

dre l'ordinateur sensible à son environnement ?

Si l'on désire améliorer les facultés d'adaptation des ordinateurs, il est primordial de les doter de capacités à se laisser modeler par l'environnement. Des travaux concernant les nouvelles architectures des ordinateurs sont fondés sur des opérateurs permettant de donner à des composants électroniques des capacités d'évolution spontanée et de régénération (Tempesti, 1998).

Dans une première partie, nous étudions les capacités que possède l'homme pour adapter son mode de traitement de l'information à son environnement. Nous montrons ensuite comment se développent au sein du système nerveux les structures nécessaires à cette adaptation. Certaines caractéristiques de la plasticité neuronale et des relations du système nerveux avec le système immunitaire sont ensuite décrites. La deuxième partie recense brièvement les voies de recherche concernant les réseaux de neurones. Elle propose une définition d'une épigénèse artificielle. La troisième partie propose la conception d'un système multi-agents neuronal chargé de simuler certaines propriétés d'épigénèse et de morphogénèse du système nerveux. Nous proposons un modèle de système multi-agents réactif fondé sur certaines caractéristiques d'adaptation empruntées au système nerveux central. Les perspectives de ce travail concernent l'application des opérateurs d'adaptation à des systèmes multi-agents cognitifs dont les agents chargés d'exécuter des tâches spécialisées sont de granularité plus importante.

1. LÀ OÙ LES CHERCHEURS EN NEUROSCIENCES TENDENT À VÉRIFIER DES THÉORIES ÉLABORÉES PAR DES PSYCHANALYSTES

Existe-t-il une mémoire d'une durée supérieure à celle d'un individu ? La réponse à cette question est d'une grande importance, elle expliquerait la nature innée de certains comportements spontanément disponibles qui relève de ce qui parfois est nommé l'instinct. Si l'on se replace dans le contexte du développement cérébral, il convient d'étudier les phénomènes de mémorisations génétiques, c'est-à-dire le mode d'héritage des expériences et des aptitudes qui sont transmises par les ancêtres au sein d'une espèce. En effet, le principal avantage du cerveau sur l'ordinateur, c'est qu'il est déjà équipé d'une formidable quantité de connaissances qui lui sont procurées par l'évolution de l'espèce.

1.1. La conscience collective selon les psychanalystes

Traditionnellement, les psychanalystes sont farouchement opposés aux neurosciences, notamment à une description du cerveau en termes de réseaux de neurones interconnectés. En effet, selon les psychanalystes, le cerveau, du fait de sa complexité, est inaccessible à toute description biologique qu'ils jugent réductionniste et inappropriée. Ainsi, les efforts des biologistes et des généticiens pour comprendre le fonctionnement cérébral seraient sans espoir. Cette attitude a été encore renforcée par des aberrations qui ont conduit certains généticiens à supposer l'existence du "chromosome du crime" ou de "l'alcoo-

lisme". Ainsi, les psychanalystes renoncent à cette description et se réfugient dans la définition d'entités conceptuelles comme le conscient, l'inconscient, le Moi, le ça... fondées sur l'observation et la pratique clinique. L'aspect pragmatique de la démarche psychanalytique ne manque pas d'intérêt et nous allons montrer que les travaux en neurobiologie peuvent permettre de vérifier des connaissances empiriques mises à jour par les psychanalystes. Les travaux de Jung, en particulier, distinguent dans le développement de la pensée ce qui concerne la conscience collective (qu'il définit comme un "socle initial") de la conscience individuelle qui se développe au cours de la vie de l'individu.

Ainsi, Carl Gustav Jung citant Pierre Janet : *"La psyché collective embrasse les 'parties inférieures' des fonctions psychiques, la part profondément enracinée, qui se déroule et s'exerce en quelque sorte par automatisme, cette part héritée et présente en chacun, donc impersonnelle et suprapersonnelle, de la psyché de l'individu... la psyché collective. Cette notion de conscience collective, présente en tout un chacun est considérée comme héritée, alors que "le conscient et l'inconscient personnel constitueraient les parties supérieures des fonctions psychiques donc la part acquise et développée ontogénétiquement."* (Jung, 1964, p. 65).

1.2. Quelques éléments de réponse fournis par l'embryologie du système nerveux

L'étude du développement du système nerveux central se trouve au carrefour de l'embryologie et des neurosciences.

1.2.1. Le développement embryonnaire du système nerveux

Le développement embryonnaire est riche d'enseignements puisqu'à partir d'une seule cellule souche (l'œuf) toutes les cellules notamment celles du système nerveux central vont se différencier et s'organiser pour former les tissus. L'embryon comporte au départ (vers le 15^e jour) trois feuilletts : l'entoblaste à l'origine du tube digestif et des parties antérieures de l'organisme ; le chordomésoblaste qui donnera naissance à la colonne vertébrale et l'ectoblaste qui donnera naissance à la plaque neurale et au revêtement cutané. La plaque neurale va se creuser, donner naissance à la gouttière neurale (21^e jour) puis après une fusion se produisant en arrière, elle forme le tube neural qui est à l'origine de l'ensemble du système nerveux central et périphérique. Pendant ce temps, le chordomésoblaste va former l'armature vertébrale destinée à le protéger. Enfin, le tube neural va se segmenter et se replier sur lui-même d'arrière en avant donnant naissance au cerveau. *"L'extrémité de la crosse qui juxte la courbure la plus prononcée, la flexion céphalique, se renfle et donne le cerveau antérieur ou prosencéphale. Le mésencéphale ou cerveau moyen est issu de la flexion céphalique. Le cerveau postérieur ou rhombencéphale est issu de la portion longue et relativement droite. En arrière de la flexion cervicale, le tube neural forme l'ébauche de la moelle épinière. Le prosencéphale rostral forme le télencéphale comprenant les ébauches des deux hémisphères cérébraux, de l'hippocampe, des ganglions de la base. La partie caudale du prosencéphale forme le diencéphale d'où*

dérivent le *thalamus*, l'*hypothalamus* et la *couche optique*. Le *mésencéphale* donne les *pédoncules cérébraux*, les *tubercules quadrijumeaux* et l'*aqueduc de Sylvius*. La *partie rostrale du rhombencéphale* donne le *métencéphale* qui va former le *cervelet* et le *pont du cerveau adulte*... Tandis que le *dernier segment appelé myélocéphale* donnera naissance au *bulbe rachidien*" (Purves et al., 1999, chapitre 20, p. 381-382).

L'appartenance à telle ou telle partie de l'œuf primordial conditionne les spécialisations possibles pour une cellule donnée. Toutefois, chaque cellule est porteuse de l'ensemble du matériel génétique. C'est-à-dire que potentiellement toutes possèdent l'information nécessaire pour devenir n'importe quelle cellule de l'organisme.

1.2.2. La différenciation cellulaire

Quel que soit le tissu : sang, matière cérébrale, il existe des **cellules souches indifférenciées**. Ces cellules souches, au sein de ce que l'on appelle des lignées cellulaires, vont se spécialiser de plus en plus afin de remplir un rôle fonctionnel et architectural bien précis. Pour chaque cellule, la topologie (dans les feuillettes puis les structures cérébrales) et les précédentes spécialisations (la lignée cellulaire dont cette cellule est issue) orientent les différenciations possibles pour sa descendance.

Au fur et à mesure des spécialisations, l'ensemble des différenciations possibles s'amenuise. Le génome reste le même mais son expression est restreinte par des mécanismes d'inactivation. De sorte que seuls les gènes nécessaires à la fonction spécifique de chaque cellule vont s'exprimer et

lui permettre de synthétiser les protéines et substances nécessaires à sa structure et à son fonctionnement.

A partir des cellules souches du système nerveux se forment deux principales catégories de cellules : les neurones et les cellules gliales. Hélas, il faut bien constater que la plupart des architectures de réseaux de neurones artificiels ne tiennent pas compte du fait qu'il existe environ une centaine de catégories de neurones différents pourvus de caractéristiques distinctes.

La maturation du système nerveux durant l'embryogenèse s'accompagne d'une mort neuronale importante (compensant la prolifération des lignées cellulaires) dont le taux diminue pour ensuite se stabiliser. Les phénomènes d'apprentissage apparaissent souvent comme des phénomènes exclusivement additionnels.

La morphogenèse du cerveau est un processus qui se superpose à la différenciation. Elle gouverne la structure spatiale et les inter-relations des différentes parties du système nerveux. Ces informations concernant la position des organes sont fournies par des gènes de développement ou gènes homéotiques (Prochiantz, 1989 ; Purves et al., 1999). On connaît la séquence de nucléotides qui caractérise ces gènes. Leur rôle est de coder la position relative des organes et en particulier des formations cérébrales. Ils expriment ce que nous appellerons plus loin des contraintes de structures macroscopiques.

1.2.3. L'épigenèse et la conscience

L'organisme se forme à partir de la différenciation d'une cellule unique contenant le génome. Mais

le génome ne contient pas toutes les informations qui définissent la nature et le fonctionnement d'un individu. En effet, l'ensemble des gènes ne représentent qu'un plan général de développement d'un individu, il définit l'ensemble des possibles à chaque étape de la différenciation et de la morphogénèse. Mais les aptitudes physiques et psychiques, le langage... dont nous sommes dotés sont le résultat d'une longue évolution sociale qui se traduit par le développement ou l'atrophie de telle ou telle partie de l'encéphale. Cette structure est vraisemblablement codée dans les gènes homéotiques. Ainsi, voici une explication plausible de la notion de conscience collective telle qu'elle est décrite par Jung et Janet. Concernant la conscience individuelle, elle découle du mode d'exécution du programme génétique, et surtout des événements qui vont agir sur le développement de telle ou telle population de cellules neuronales. Ce développement n'a pas lieu uniquement pendant l'embryogenèse mais se produit durant toute la vie.

1.3. La plasticité neuronale et l'apprentissage

Après avoir abordé les contraintes qui s'appliquent à la structure macroscopique du système nerveux central, nous allons décrire les modes de connexion et de communication qui existent entre les neurones au sein des structures nerveuses et comment ceux-ci peuvent évoluer.

1.3.1. Les relations entre le système nerveux et le système immunitaire

A première vue, le système nerveux central et le système immu-

nitaire semblent organisés très différemment. Le cerveau est habituellement décrit comme un centre de commande centralisé envoyant et recevant des potentiels électriques le long de réseaux de neurones. Par opposition, le système immunitaire est décentralisé et les organes qui le forment (la rate, les noyaux lymphatiques, la moelle osseuse) sont disséminés dans l'ensemble de l'organisme. Le système immunitaire communique en déversant dans le sang des cellules immunitaires, des anticorps et des hormones chargées de véhiculer des informations (stimulation ou déplétion) dans l'ensemble du corps. En fait, le système immunitaire et le système nerveux sont similaires dans la manière de recevoir, reconnaître et intégrer des signaux provenant de l'environnement extérieur (Sternberg et Gold, 1997). De plus, Anspach et Varela (1992) définissent le système immunitaire ainsi que le système nerveux comme un réseau cognitif. Les deux systèmes présentent les mêmes capacités cognitives. De plus, ces capacités sont des propriétés émergentes résultant de l'état global de chacun des réseaux biologiques. La fonction principale du système immunitaire n'est pas de défendre l'organisme mais plutôt, en tant que système cognitif autonome, de définir l'identité moléculaire de chaque individu (id.). Le système hormonal et le système nerveux central sont deux systèmes cognitifs autonomes mais étroitement reliés. Ils possèdent les mêmes facultés de communication. Plus précisément, la capacité de communication est spécialisée selon le type, la fréquence, la durée de validité du message à transmettre. Par exemple, la peur résulte de la perception et de l'évaluation par le cerveau d'une situation mena-

çante. Elle produit le déclenchement par la glande surrénale d'une sécrétion d'adrénaline (une hormone très proche de la noradrénaline qui est un neurotransmetteur) et le message hormonal est véhiculé par le sang instantanément vers toutes les cibles potentielles du message. Ce message hormonal est notamment interprété par des cellules nerveuses du tronc cérébral (noyaux C1-C2) ayant des projections dans de nombreuses structures cérébrales, notamment dans le thalamus, le cortex et la formation réticulée (Gaspar, 1995). L'effet du message est de stimuler l'ensemble des neurones impliqués dans l'attention et les fonctions de défense préparant ainsi le corps à affronter le danger. Dans un même temps, les récepteurs cardiaques produisent une accélération du cœur afin de fournir le flux sanguin nécessaire.

1.3.2. Les différents modes de communication entre neurones

On recense quatre types principaux de communication entre neurones :

- les synapses électriques sont bidirectionnelles, elles permettent le passage direct d'ions et de certaines molécules directement à travers des membranes cellulaires. Ce mode de transmission est très rapide ;
- les synapses chimiques comportent une fente synaptique dans laquelle se déverse un neuromédiateur qui va venir activer les récepteurs situés sur la membrane post-synaptique (c'est-à-dire la dendrite ou le corps cellulaire du neurone cible) ;

- le mode paracrine permet à un neurone de transmettre des messages à un ensemble de cellules cibles situées dans son voisinage sans synapse. Le neurone émetteur déverse dans le liquide extra-cellulaire un neuromodulateur qui atteint de manière élective les neurones porteurs des récepteurs adéquats. Il s'agit d'un mode de transmission plus lent mais durable ;
- le mode hormonal transmet des messages dans l'ensemble du corps par l'intermédiaire du courant sanguin. L'hormone est sécrétée par un neurone ou une cellule endocrine, elle est véhiculée jusqu'aux cellules gliales qui filtrent et transmettent l'hormone aux neurones pourvus des récepteurs cellulaires appropriés.

Les deux premiers modes de transmission sont habituellement pris en compte par les réseaux de neurones, il n'en est pas de même des modes paracrines et hormonaux.

2. LES RÉSEAUX DE NEURONES ET LES AUTOMATES CELLULAIRES

La théorie générale et logique des automates a été proposée par John Von Neumann (Von Neumann, 1951). Cette théorie consiste à proposer des automates artificiels chargés de mimer le comportement des organismes naturels.

La théorie des réseaux de neurones formels a été proposée par Mac Culloch et Pitts. Cette notion est conforme à la théorie des automates formulée par John Von Neumann (Chazal, 1996). Dans le modèle proposé par McCulloch et

Pitts, les neurones artificiels sont des automates mathématiques stockés sur un réseau représenté sous la forme d'une matrice. Certains neurones, appelés neurones d'entrée, jouent le rôle de neurones sensoriels et permettent au réseau d'acquérir de l'information sur l'environnement. Ils constituent, par exemple, une rétine artificielle. Les états de cette couche sont répercutés dans tout le réseau ; puis, une stabilisation caractéristique de la situation mémorisée se produit. C'est cette configuration particulière des états des neurones artificiels organisés en réseau qui constitue l'information mémorisée et prend le nom de "mémoire associative". Depuis, de nombreux autres modèles ont été proposés.

Le "perceptron" proposé par Rosenblatt est un représentant des réseaux de neurones multicouches (Rosenblatt, 1962). Marvin Minsky et Seymour Papert ont montré les limites d'une telle approche (Minsky et Papert, 1969). Des travaux ont permis de lever certaines insuffisances du perceptron : la règle de Widrow et Hoff (1960), la rétro-propagation du gradient (Le Cun, 1986 ; Rumelhart et McClelland, 1986).

Bien d'autres modèles ont été proposés, notamment d'apprentissage non supervisés, par exemple le modèle de Teuvo Kohonen (Kohonen, 1982 ; Kohonen, 1984). Des applications récentes à l'organisation de fonds documentaires montrent l'utilité de ce type de modèle (Kohonen et al. 2000). John Von Neumann avait déjà recensé les principaux aspects de l'élaboration de systèmes artificiels : comment des éléments organisés peuvent-ils former un tout ? Comment le fonctionnement de ce tout peut-il être exprimé en termes de

ces éléments ? Les réponses à ces questions concernent aujourd'hui à la fois les réseaux de neurones et les systèmes multi-agents. En effet, dans les deux cas, les composants de ces systèmes peuvent être assimilés à des automates formant un système artificiel apprenant (Wang et Mckenzie, 1999a).

2.1. La loi de Hebb

Selon la loi de Hebb, si un neurone d'entrée (n_i) est proche d'un neurone cible (n_j) et si le premier stimule de manière répétitive le deuxième, on observe un phénomène de croissance qui conduit au renforcement de la connexion (n_i-n_j), c'est-à-dire un accroissement de l'efficacité de la stimulation du neurone d'entrée n_i sur le neurone cible n_j . La durée de cet effet de renforcement est limitée. Ce mécanisme est assez bien traduit par les réseaux de neurones classiques en augmentant la valeur du poids de la synapse w_{ij} unissant les neurones n_i et n_j (Rumelhart, 1989). Il existe ainsi une première forme de plasticité neuronale.

2.2. Au-delà de la loi de Hebb

Lorsqu'une population de neurones est soumise à une stimulation (par exemple de la voie nociceptive de la moelle épinière d'un rat), on observe que ces neurones modifient leur mode de communication et passent d'un mode de transmission paracrine à un mode de transmission synaptique, c'est-à-dire à un mode plus précis et plus efficace (Ridet et al., 1993). L'organisation du tissu nerveux s'en trouve alors modifiée et un nouveau type de régulation et de métabolisme est adopté par ces

neurones. Ce deuxième mécanisme de plasticité correspond à un phénomène d'apprentissage à long terme qui va bien au-delà de la loi de Hebb.

2.3. Une définition de l'épigénèse

Le plan général du cerveau est exprimé par le code génétique, notamment par les gènes homéotiques. Les stimuli de l'environnement sont responsables de l'évolution effective, des différenciations cellulaires qui vont se produire et donc de la structure finale du système nerveux et des connexions cérébrales. On distingue donc deux catégories de données : celles qui expriment les composants de base du système (les neurones, les noyaux, les couches) et celles qui représentent des contraintes de structure et de différenciation chargées d'exprimer les transitions possibles du système.

On recense trois catégories de contraintes :

- des *contraintes de composition* : dans une couche ou un noyau on ne trouve que des agents neurones appartenant à certains types ;
- des *contraintes de connexité* : des agents neurones d'un certain type ne peuvent être en contact qu'avec des agents neurones de type compatible ;
- des *contraintes de spécialisation* : un type d'agents neurones peut se différencier pour donner un type d'agents spécialisés pourvu de nouvelles propriétés de communication, de durée de vie, de déclenchement... Toutefois, cette spécialisation doit tenir compte des spécialisations antérieures (c'est-à-dire de la hiérarchie de spé-

cialisations déjà formée). La spécialisation d'un groupe de cellules a lieu sous l'effet d'une hyper ou d'une sous-stimulation et éventuellement de contraintes temporelles (intervalle de temps d'activité). La spécialisation a lieu selon l'intensité du flux de données transitant par les agents neurones concernés à des périodes précises. Pour l'instant, les capacités d'épigénèse artificielle, exprimées par le système multi-agents décrit dans la partie suivante, se résument à des contraintes de connexité, des contraintes de composition et des contraintes de spécialisation. Ces contraintes sont contrôlées par un agent superviseur et sont modélisées à l'aide d'un modèle orienté objet et d'opérateurs de connexité (Colloc et al., 1996).

3. LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME MULTI-AGENTS NEURONAL

Les systèmes multi-agents couvrent un large spectre d'applications allant de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) à la vie artificielle. L'IAD met plutôt en jeu des agents cognitifs de structure complexe, tandis que la vie artificielle utilise plus fréquemment des agents réactifs (Ferber, 1995 ; Ostolaza et Bergareche, 1992).

Nous proposons d'utiliser un système multi-agent réactif pour simuler la plasticité neuronale et la transmission du message hormonal. Les types d'agents sont modélisés à l'aide d'une approche orientée objet (Colloc, 1995).

3.1. L'utilisation d'agents réactifs

Les systèmes multi-agents réactifs mettent en jeu de nombreux agents de faible granularité qui, malgré une structure frustre, sont capables de faire émerger des comportements sophistiqués intelligents. Ils sont déclenchés par les stimuli de l'environnement. Ils sont capables de répondre à des tâches simples et fonctionnent selon un mode réflexe. Ils sont dotés de capacités de perception des événements de l'environnement et de tropisme, ce qui leur permet de s'orienter dans l'espace ou éventuellement de se grouper par affinité. Chaque agent est spécialisé et ne possède pas d'intelligence propre. C'est de la combinaison de leurs comportements que peuvent naître certaines formes d'intelligence. Les neurones du système nerveux possèdent de nombreuses similitudes avec les agents réactifs. L'architecture des systèmes multi-agents réactifs est fondée sur le comportement. Ils s'affranchissent de la notion de représentation (Brooks, 1991 ; Müller, 1996).

Le système nerveux est composé de nombreuses couches, noyaux et projections nerveuses qui sont interconnectées au niveau macroscopique. Si l'on considère le niveau microscopique, de nombreux neurones sont connectés ensemble

par des synapses. Ce niveau est en continuel changement. Les capacités du système nerveux émergent de cette organisation. Un système multi-agents réactif est capable de fournir des comportements intelligents même si chaque agent comporte une structure rudimentaire (Drogoul et Collnot, 1998).

3.2. Proposition d'un système multi-agents

Son objectif est de simuler certaines propriétés des neurones du système nerveux, notamment les modes de communication qui viennent d'être présentés (Colloc, 2000).

La figure 1 représente des liens macroscopiques entre deux couches A et B et des amas de neurones A1, A2, B1, B2, tels que l'on peut en observer dans le système nerveux (Delacour, 1998). Ces liens macroscopiques sont exprimés par des contraintes de connexité.

Le système multi-agents représenté sur la figure 2 repose sur un modèle d'agent réactif. Les liens microscopiques entre les agents neurones sont établis à l'aide d'objets jonctions, tels qu'ils viennent d'être présentés. Les objets jonctions sont dotés de fonctions permettant d'exprimer un

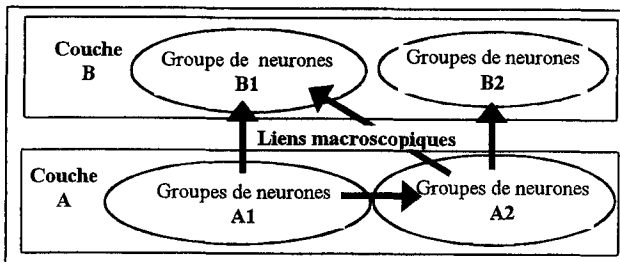


Figure 1 : Description de liens macroscopiques entre couches ou systèmes de neurones

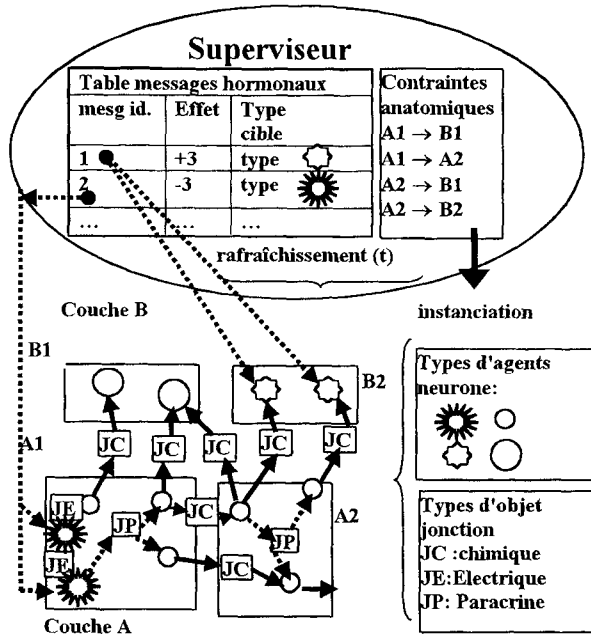


Figure 2 : Implémentation d'un système multi-agents neuronal

renforcement ou une inhibition au sens de la loi de Hebb. Les objets jonctions permettent d'exprimer des contraintes de connexité : le type et la cardinalité des neurones connectés, la polarité. En effet certaines connexions sont orientées, par exemple les synapses chimiques, tandis que d'autres comme les synapses électriques sont bidirectionnelles.

La référence d'un agent neurone à une synapse chimique est représentée à l'aide d'un pointeur vers un objet jonction chimique. Cet objet à polarité unidirectionnelle comporte une fonction de déclenchement qui exprime le comportement agoniste ou antagoniste de la synapse.

Les synapses électriques sont représentées de la même manière mais les objets jonctions électriques sont bidirectionnels.

Le mode paracrine est exprimé par un objet jonction paracrine qui diffuse son message sur les neurones cibles adjacents d'un type cible donné. L'objet jonction paracrine gère une liste des neurones du voisinage qui correspondent à ce type.

Le message hormonal est simulé par un tableau noir qui est géré par l'agent superviseur. Les messages sont stockés dans le tableau noir et sont destinés à un type d'agent neurone. Tous les agents neurones du type cible sont affectés par le message qui peut produire une excitation ou au contraire une inhibition. Un mécanisme de rafraîchissement établit un temps logique. Durant un cycle, les transactions des agents neurones sont effectuées, plaçant le système dans un nouvel état stable. Durant une trans-

action, certains objets jonctions peuvent être renforcés ou inhibés. Certaines jonctions peuvent apparaître ou disparaître. Certains agents neurones peuvent changer de mode de communication.

Ces différents modes de communication sont représentés par des composants, qui peuvent être combinés pour construire de nouveaux types d'agents spécialisés. La spécialisation orientée objet permet ainsi de simuler la différenciation des neurones.

3.3. Simulation des capacités morphogénétiques et épigénétiques à l'aide d'un agent superviseur

La capacité de reproduction est définie comme la possibilité de déclencher l'instanciation d'un agent neurone de même type. Toutefois, cette reproduction est limitée dans le temps et dans l'espace afin de se conformer aux contraintes macroscopiques. L'ensemble des agents neurones sont des instances du même type d'objet de base (représentant une cellule souche) disposant de l'ensemble des capacités de communication qui viennent d'être décrites. La différenciation des neurones est simulée par la spécialisation des modèles objets. Chaque type d'agent neurone est associé avec une variable de classe servant de compteur d'instances et un seuil limitant le nombre de neurones de ce type pouvant être générés. La simulation des contraintes morphogénétiques est plus délicate, elle nécessite d'établir des contraintes topologiques.

Les connections macroscopiques sont contrôlées par des contraintes de connexité exprimées par l'agent superviseur (contraintes anatomiques, figure 2).

Les accointances des agents neurones sont définies dans l'agent superviseur par une table de pointeurs et par l'origine topologique des agents qui dépend du noyau où l'agent neurone a été créé, par exemple dans les groupes de neurones A1, A2, B1, B2 (figure 1 et figure 2).

3.4. La simulation de la plasticité des connexions entre neurones

L'adaptation concerne les possibilités de connexions des objets agents. Afin d'établir les propriétés de plasticité, les agents neurones doivent avoir la possibilité d'établir ou de supprimer des connexions avec d'autres agents.

La première possibilité est d'instancier des objets jonctions synapses et de supprimer les objets synapses qui deviennent inactifs. Par exemple, si une jonction est très sollicitée, les neurones voisins sont sollicités pour instancier de nouveaux objets synapses vers les aires de haute activité.

L'autre moyen consiste pour l'agent neurone de changer de mode de communication pour en adopter un plus efficace. Un petit automate détermine les transitions autorisées.

3.5. L'implantation d'un système multi-agents réactif

L'implantation d'un tel système multi-agents est fondée sur une modélisation objet des objets jonctions. Les liens microscopiques entre les objets agents neurones sont implantés à l'aide d'objets jonctions qui comportent une fonction paramétrée par le temps. Les objets jonctions peuvent exprimer des renforcements, des inhibitions ou des périodes réfrac-

taires (aucune stimulation n'est alors possible). De plus, les objets jonctions sont utilisés pour exprimer des contraintes de connexité : le type et la cardinalité des neurones connectés, la polarité représentant le sens du flux d'information (Colloc et al., 1996). En effet, certaines jonctions sont orientées (synapses chimiques) d'autres non (synapses électriques). L'utilisation de types d'objets jonctions de base est une bonne solution pour conserver la modularité et l'indépendance des types d'objets agents.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de cette recherche, nous avons montré que les limites d'évolution des ordinateurs étaient constitutionnelles.

Notre approche est fondée sur les connaissances en neurosciences et en embryologie.

Le système présenté s'appuie sur un système multi-agents réactifs supervisé dans l'attente de pouvoir coder au sein des agents eux-mêmes, les propriétés des types d'agents. Quirolgico a souligné la difficulté de coder et de transmettre des informations sub-symboliques (correspondant à l'état d'un réseau de neurones) d'un agent à un autre (Quirolgico, 1999).

Les perspectives de cette recherche s'inscrivent selon deux aspects :

- une perspective à court terme qui concerne l'adaptation du modèle proposé à des systèmes multiagents cognitifs, qui, dans le cadre d'une intelligence artificielle distribuée, pourraient bénéficier d'opérateurs d'adaptation (agoniste ou antagoniste) établis selon la pertinence de

l'action de ces agents dans l'environnement. Une telle approche sert à détecter et sélectionner les agents munis des meilleures heuristiques dans un environnement compétitif ;

- une perspective à long terme qui verra apparaître des ordinateurs doués d'opérateurs de perception, d'adaptation et d'évolution. Dans ce cas, l'architecture de tels ordinateurs n'est pas fixée mais déterminée par les informations provenant de l'environnement.

L'implantation du modèle proposé a lieu à l'aide d'un modèle objet possédant les capacités dynamiques nécessaires pour développer les opérateurs d'adaptation. La réalisation d'un prototype est en cours. Des bibliothèques logicielles existent pour implanter des réseaux de neurones avec une approche orientée objet (Rogers, 1997). Ces bibliothèques fournissent des types d'objets neurones qui peuvent être spécialisés. Toutefois, il faut leur apporter des modifications substantielles pour pouvoir implanter des agents neurones conformes au modèle de système multi-agents qui vient d'être présenté. Le principal avantage de cette approche est d'implanter des modes de communication entre neurones beaucoup plus variés que dans les réseaux de neurones classiques (modes électrique, chimique, paracrine et hormonal).

BIBLIOGRAPHIE

American Academy of Pediatrics (1999), « The treatment of Neurologically Impaired Children Using Patterning (RE9919) », *Pediatrics*, Vol. 104, n° 5, p. 1149-1151.

- Anspach, M.R. and Varela, F. (1992), « Le système immunitaire : un "soi" cognitif autonome », in *Introduction aux sciences cognitives*, (D. Andler), ed. Gallimard, p. 489-508, ISBN 2-07-032577-6.
- Baddeley, A.D. (1990), *Human memory : theory and practice*, Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Balakrishnan, K. et Honavar, V. (1995), *Evolutionary Design of Neural Architectures - A Preliminary Taxonomy and Guide to Literature*, Artificial Intelligence Research Group, Dept of Computer Science, Iowa State University, Technical Report 95-01.
- Beeman, D., Bower, J.M. (1997), « The GENESIS Simulator-based Neuronal Database », in Efthimiadis E.N., Goddard N., Leigh J., *Neuroinformatics : an overview of the human brain project*, Lawrence Erlbaum Assoc., Mahawah, ed. by Koslow and Huerta, NJ, p. 57-81.
- Bower, J.M. (1992), « Modelling the nervous system », *Trends in Neurosciences*, n° 15, p. 411.
- Brooks R.A. (1991) « Intelligence without représentation », *Artificial Intelligence*, n° 47, p. 139-159.
- Changeux, J.-P., Ricœur, P. (1998), *Ce qui nous fait penser, la nature et la règle*, ed. Odile Jacob, Paris, 350 p.
- Chazal, Gérard (1996), *La Pensée et les machines : le mécanisme algorithmique de John von Neumann*, ed. Champ Vallon, coll. Milieux, Seyssel, p. 9-58.
- Churchland, P.S. and Sejnowski, T.J. (1993), *The computational brain*, 2nd ed. MIT Press, Cambridge MA, USA, 544 p.
- Cardon, A. (2000), *Conscience artificielle & systèmes adaptatifs*, ed. Eyrolles, Paris, 380 p., ISBN 2-212-09124-9.
- Colloc, J. (1995), « Une approche orientée objet de la diversité cellulaire dans la composition de réseaux de neurones hétérogènes », In *Le neuro-mimétisme, Epistémologie, neurobiologie, informatique*, ed. Hermès, Paris, p. 283-295, ISBN 2-86601-487-1.
- Colloc, J., Talens, G., Dubois, G. (1996), « Modélisation de réseaux grâce à la composition et la connexité », In proc. *INFORSID'96*, Bordeaux, France, p. 101-117.
- Colloc, J. (2000), « A Multi-Agent System to Simulate Hormone and Paracrine Messages in the Nervous System », in *Proceedings of EIS'2000, ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems*, Paisley, Scotland, UK, p. 592-598.
- Delacour, J. (1998), *Une introduction aux neurosciences cognitives*, ed. Deboeck Université, Paris, Bruxelles, 240 p., ISBN 2-8041-2818-0.
- Dessalles, J.-L. (1996), *L'ordinateur génétique*, ed. Hermès, Paris, 141 p.
- Delahaye, J.-P. (1993). *Logique, Informatique et paradoxes*, ed. Pour la Science diffusion Belin, Paris, 158 p.
- Dreyfus, H.L. (1984), *Intelligence artificielle mythes et limites*, ed. Flammarion, 443 p.
- Drogoul, A. and Collinot, A. (1998), *Between methodological reductionnism and intentional strategy, ethology, an alternative model for DAI*, Rapport Rech. LIP6 1998/40.
- Drogoul, A., Ferber, J. (1992), *Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies : Application to Social Differentiation in Ant Colonies*, MAA-MAW'92, Castelfranchi & Werner.
- Eccles, J.C. (1997), *Comment la conscience contrôle le cerveau*, tr. Fra., ed. Fayard, Paris, 255 p.
- Epelbaum, J. (1995), *Neuropeptides et neuromédiateurs*, Les Editions INSERM, 2^e ed., 306 p. ISBN 2855986591.
- Elliott, T., Howarth, C.I., Shadbolt, N.R. (1996), « Axonal processes and neural plasticity. I : Ocular dominance columns », *Cerebral Cortex*, ed. Oxford University Press, Vol. 6, p. 781-788.
- Fogelman Soulié, F. (1989), « Applications des méthodes connexionnistes en intelligence artificielle », CIRILLE, 3^e Université d'été, *Réseaux connexionnistes en informatique méthodes et applications*, 3 au 7 juillet, 1989, Université Lyon 1, 1989, p. 1-13.
- Gaspar, P. (1995), « Noradrénaline », in *Neuropeptides et Neuromédiateurs*, ed. by Epelbaum J., Les Editions INSERM, 2^e ed., p. 187-197, ISBN 2855986591.

Goldman-Rakic, P. (1992), « Mémoire et pensée », *Pour la science*, n° 181, p. 88-97.

Jung, C.G. (1964), *Dialectique du Moi et de l'inconscient*, ed. Gallimard, Trad. R. Cahen, Ed. orig. 1933, *Die beziehungen zwischen dem ich und dem unbewussten*, coll. Folio essais, 287 p., ISBN 2070323722.

Kalil, R. (1990), « La formation des synapses dans le cerveau », *Pour la science*, n° 148, p. 56-63.

Kandel, E., Hawkins, R. (1992), « Les bases biologiques de l'apprentissage », *Pour la science*, n° 181, p. 88-97.

Kohonen, T. (1982), « Self-organized formation of topologically correct feature maps », *Biologie Cybernetic*, n° 43, p. 59-69.

Kohonen, T. (1984), *Self organization and associative memory*, Springer Series in Information Sciences, Springer Verlag, Vol. 8.

Kohonen, T., Kaski, S., Lagus, K., Salojärvi, J., Honkela, J., Paarero, V., Saarela, A. (2000), « Self Organising of a massive document collection », *IEEE Transactions on Neural Network*, Vol. 11, n° 3.

Le Cun, Y. (1986), « Learning process in an asymmetric threshold network », in *Disordered Systems and Biological Organization*, ed par E. Bienenstock, F. Fogelman Soulié, G. Weisbuch, NATO ASI Series in Systems and Computer Science, Springer Verlag, F20, p. 233-240.

McCulloch, W.S., Pitts, W. (1943), « A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity », *Bulletin of Mathematical Biophysics*, n° 5, p. 115-133.

McCarthy, J. (1971), « Generality in Artificial Intelligence », 1971 Turing Award Lecture, in *ACM Turing Award Lectures, The First Twenty Years, 1966-1985*, ed by ACM Press, p. 257-268.

Minsky, M., Papert, S. (1969), *Perceptrons*. Cambridge, MA : MIT Press, 1969.

Möller, R., Paschke, P. (1996), « Simulation of cortex-like neural networks on a CNAPS SIMD neurocomputer », *Neural Processing Letters* Vol. 4, n° 2, p. 67-74.

Müller, J.P. (1996), *The Design of Intelligent Agents - A layered Ap-*

proach, ed. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 227 p., ISBN 3-540-62003-6.

Ostolaza, J.F., Bergareche, A.M. (1992), *La vie artificielle*, ed. du Seuil, Paris, trad. Française, 1997, 151 p., ISBN 2-02-024744-5.

Prochiantz, A. (1989), *La construction du cerveau*, ed. Hachette, 128 p., ISBN 2012350281.

Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Katz, L.C., LaMantia, A.S., McNamara, J.O. (1999), *Neurosciences*, chap. 20, Les débuts du développement cérébral, ed. DeBoeck Université, 1999, 602 p.

Quiroigco, S. (1999), *Cumminating Neural Networks in a Multi-Agent System*, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, Baltimore County, 168 p.

Ridet, J.L., Rajaofetra, N., Tellhac, J.R., Geffard, M., Privat, A. (1993), « Evidence for nonsynaptic serotonergic and noradrenergic innervation of the rat dorsal horn and possible involvement of neuron-glia interactions », *Neuroscience*, n° 52, p. 143-157.

Rogers, J. (1997), *Object Oriented Neural Networks in C++*, Academic Press, 1997, 310 p., ISBN 0-12-593115-8.

Rosenblatt, F. (1962), *Principles of neurodynamics*, New York, ed. Spartan.

Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. (1986), *Parallel distributed processing : explorations in the microstructures of cognition*, MIT Press, 1986.

Rumelhart, D.E. (1989), « The Architecture of Mind : A Connectionist Approach », in *Foundations of Cognitive Science*, ed. by Posner, 2nd ed. Bradford book, MIT Press, 1990 (1st 1989), 870 p., ISBN 0-262-16112-5.

Sekanina, L., Sllame, A. (2000), « Toward Uniform Approach to Design of Evolvable Hardware Based Systems ». In *Field-Programmable Logic and Applications - FPL'2000*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Villach, Austria, p. 814-817.

Shatz, C. (1992), « La maturation du cerveau », *Pour la science*, n° 181, p. 88-97.

Spinelli, D.N. (1988), « A Trace of Memory : An Evolutionary Perspective on the Visual System ». In *Vision*,

Brain, and Cooperative Computation. ed. by M.A. Arbib and A.R. Hanson, a Bradford book, The MIT Press, Cambridge, 2nd pr., p. 165-182.

Sternberg, E.M., Gold, P.W. (1997), « The mind-body interaction in disease », *Scientific American Mysteries of the Mind*, Scientific American, New York, Sp. Issue, Vol. 7, n° 1, p. 8-15.

Tempesti, G.L. (1998), *A Self-Repairing Multiplexer-Based FPGA Inspired by Biological Processes*, Thèse n° 1827, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Varela, F.J. (1979), *Principles of Biological Autonomy*, Elsevier North-Holland, New York.

Venance, L., Prémont, J., Glowinski, J. and Giaume, C. (1998), « Gap junctional communication and pharmacological heterogeneity in astrocytes cultured from the rat striatum », *Journal of Physiology*, Vol. 510, n° 2, p. 429-440.

Vibert, J.F., Azmy, N. (1989), « Simulation de la genèse d'un rythme biologique par des réseaux interconnectés ». In : *Neural networks and their applications*. Hérault J, ed. EC2 Paris, p. 317-330.

Von Neumann, J. (1951), *Théorie générale et logique des automates*, trad. Fra. par J.-P. Auffrand, *The General and Logical Theory of Automata, in Cerebral Mechanisms in behavior*, Llyoyd A. Jeffries ed., New York 1951, J. Willey and sons, ed. tra. Fra. Champ Vallon, coll. Milieux, Seyssel, 1996, p. 61-105, ISBN 2876732327.

Wang, F. et Mckenzie, E. (1999a), A « Multi-Agent based Evolutionary Artificial Neural Network for General Navigation in Unknown Environments », *Proceedings of the ACM 3rd Int. Conference on Autonomous Agents, Agents'99*, Seattle, Washington, USA, May, p. 154-159.

Wang, F. et Mckenzie, E. (1999b), « Multifunctional Learning of a Multiagent based Evolutionary Artificial Neural Network with Lifetime Learning », *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Monterey, USA, Nov., p. 332-337.

Widrow, G. et Hoff, M.E. (1960), « Adaptive switching circuits », *Inst. Of Radio Engineers, Western Electronic Show and Convention*, Convention Record, part 4, p. 96-104.