



Modélisations du système nerveux humain via les réseaux de Petri

Haja Andriantsilavo

► To cite this version:

Haja Andriantsilavo. Modélisations du système nerveux humain via les réseaux de Petri. 2013. hal-00789272

HAL Id: hal-00789272

<https://hal.science/hal-00789272>

Preprint submitted on 17 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisations du système nerveux humain via les réseaux de Petri

Andriantsilavo H.¹

Laboratoire d'Informatique appliquée, d'Image, de Signal, de Télécommunication et d'Automatique
(LIISTA)

Département Télécommunication – Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 - Madagascar

¹*xahajas@yahoo.fr*

Résumé

Le fonctionnement des réseaux neuronaux constituant le cerveau humain n'est pas encore élucidé. Les cartographies anatomiques abondent ; par contre celles fonctionnelles sont mal comprises et peu produites. La recherche de moyen reliant l'informatique à la neurologie incombe aux neuroscientifiques computationnelles. La contribution de cet article à la thèse proprement dite est de proposer trois principes de modélisation. La première approche part du cerveau et des systèmes nerveux : faire l'analogie entre les aires du cerveau (leurs relations) et les réseaux de Petri (RdP). La vision basée sur le cortex consistant à simuler l'architecture en couche de ce manteau permettra de déduire un modèle qui saura reproduire le fonctionnement d'une colonne corticale et leurs liaisons. Finalement, considérer chaque neurone peut servir de moyen pour produire un modèle qui représentera leurs communications.

Mots clés : réseaux de Petri, cerveau, neurones, cortex, modélisation.

Abstract

Actually, no one can clear up exactly how the neuron network of the human brain works. Anatomic maps are numerous, but functional maps are rarely produced and understood. It falls to computational scientists to find the way to use informatics in neurology. This article offers to the final these three principles of modelisation. The first proposition start with the brain and the neuronal system : making the analogy between the zones of human head (their relations) and the Petri net. Another way is to simulate the layer architecture of the cortex and find out a model which can reproduce the cortical column function and their connections. Finally, a model which represents the communications between neurons is made by considering each neuron.

Key words : Petri Net, brain, neurones, cortex, modelisation.

1 Introduction

La recherche d'une modélisation plausible du cerveau est d'actualité. Cette évolution suscite l'intérêt de l'informaticien qui est sollicité pour générer des références aidé des neuroscientifiques. La liaison des centres nerveux par les influx sensibles et sensoriels constitue le réseau neural, l'élément clé étant le neurone. Il effectue la transmission et le traitement de petites informations qui transiteront le long des fibres nerveuses (axone et arbre dendritique). Leur concentration massive a donné au cortex sa dénomination de substance grise. C'est cette pellicule qui intègre et synthèse les informations pour commander le cerveau et le corps tout entier. C'est la plus importante partie de cet organe. Pour modéliser un système à événements discrets, on peut utiliser les réseaux de Petri. C'est un environnement graphique qui permet de visualiser l'évolution d'un processus. La facilité de compréhension qui en dérive lui octroie une simplicité fort profitable. Le parallélisme, la concurrence et le temps réel sont des propriétés de système qui sont gérées par cet outil. Des classes de réseau traitent le problème temporel pour élargir son application. L'analyse du modèle se déduit du graphique et cela conduira vers la voie d'une réalisation grandeur nature des fonctions du réseau. La représentation est le fait de rendre plus « lisible » : en signe, en symbole ou en image, un modèle, c'est-à-dire de créer une matérialisation d'une référence. La production de nouvelles représentations est la finalité des recherches des neuroscientifiques qui se sont focalisés sur le domaine des neurosciences computationnelles.

2 Evolution

2.1 Blue Brain Project

La Brain Mind Institute de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a entamé depuis juin 2005 le Blue Brain Project. Le projet a pour objectif de fabriquer, dans un délai de dix ans, le premier « vrai » cerveau électronique à partir de données biologiques recueillies en neurologie [9] [10]. Avec son équipe de 35 scientifiques, l'initiateur de ce projet, le professeur Henry Markram, a finalisé la première phase de son expérience en décembre 2006 [9] [10] [12] [18]. La démarche suivie était d'abord de simuler une colonne corticale du néocortex d'un rat. Les tests de représentation ont servi à peaufiner ce modèle *in silico* : présentation d'images et mesure de l'activité électrique de réponse [9].

La méthodologie d'ingénierie inverse (reverse engineering) a permis d'obtenir une grande précision à l'échelle cellulaire de l'activité cérébrale [10]. La colonne corticale en question, constituée de 10000 neurones avec 30 millions de synapses sur 550 µm de diamètre et 1200 µm de hauteur, est prise dans le cortex somato-sensoriel d'un rat âgé de deux semaines en respectant les arborescences dendritiques de la cinquième couche (couche des cellules pyramidales) [10]. La modélisation a pour rôle d'examiner et d'évaluer les incohérences et pertinences des résultats. Les canaux ioniques des cellules ont été calibrés et les découvertes émanant des expériences entreprises ont été publiées en juillet 2008 au Forum européen des neurosciences [10].

Cette première étape est d'une importance capitale car la structure de la colonne corticale varie peu chez les mammifères, elle se répète des millions de fois mais les cellules constituant sont au nombre de 300 types environ [12] [18]. « Chaque neurone possède 500 briques élémentaires, dont il a fallu déterminer les caractéristiques électriques, comme la résistance, la capacité, etc. Chaque brique possède en plus 20 canaux ioniques, chacun modélisable par six équations », Felix Schürmann [12]. Pour recueillir les données biologiques, une couche est détachée de la colonne (maintenue vivante) puis les réponses aux stimulations sont enregistrées via 12 électrodes.

Selon Henry Markram, « Il existe beaucoup de modèles cérébraux, mais ils viennent souvent des sciences de l'intelligence artificielle. Notre modèle est le premier à partir des données biologiques », de plus, « les neurosciences génèrent 35000 publications par an, chaque spécialiste ne peut pas lire sérieusement plus de 100 d'entre elles. Seule la modélisation peut unifier cette connaissance très fragmentée. » [12]. La prochaine étape sera de modéliser le cerveau non plus au niveau cellulaire mais au niveau moléculaire avec les réactions chimiques protéiniques, puis des milliers de colonnes seront simulées ensemble pour augmenter la complexité du réseau et enfin en venir à bout de ce défi [12].

Afin de simuler son modèle, la Brain Mind Institute s'est associée avec IBM ; et un supercalculateur de la génération Blue Gene est installé dans le campus lausannois [9], le Blue Gene/L [10]. Avec ses 18,7 téraflops, c'est le troisième superordinateur le plus rapide au monde [9] [12], et le plus puissant existant en Suisse ; le numéro un mondial étant un modèle de la même marque installé au Lawrence Livermore National Laboratory, en Californie (478 téraflops). Sa puissance atteint 478 téraflops. Le Blue Gene/L est constitué de 8192

processeurs [10]. Le calibrage consiste en des tests pour affiner la précision biologique du modèle : expression génique, canaux ioniques, propriétés d'intégration dendritique, synapses, morphologie des neurones, composition cellulaire, voies de connexion et propriétés des sous-circuits [10]. La prochaine phase de cette recherche inédite nécessitera une machine plus performante capable de traiter des calculs de plus du petaflops ce qui est possible avec le Blue Gene/P, à venir, de IBM [12].

2.2 Simulations parallèles

Djurfeldt et al. publient le 18 octobre 2006 un article portant sur la simulation parallèle de réseau neuronal dans le cadre du projet FACETS démarré en 2005 par Meier à l'université de Stockholm. Le support matériel de la simulation est, comme le Blue Brain Project, un supercalculateur Blue Gene/L. Le simulateur utilisé est SPLIT écrit en C++. Les couches II et III du néocortex ont fait l'objet de l'étude : 22 millions de neurones et 11 milliards de connexions, l'équivalent de 16 cm² de cortex (celui d'un petit mammifère comme le rat ou la souris). L'organisation globale de la structure correspond à plusieurs minicolonnes groupées en hypercolonnes. Dans la réalité, 100 à 200 minicolonnes forment une hypercolonne ; dans SPLIT ce nombre est paramétrable et lors de leurs expériences, il est fixé à 100 par hypercolonne. L'idée est de simuler le transfert des ions lors des échanges interneuronales suivant les équations régissant le formalisme de Hodgking-Huxley. Cette approche permet de retracer le processus de mémorisation sachant que les neurones pyramidaux sont les premiers responsables de ce phénomène. Lors des journées Blue Gene Watson, les 8192 processeurs du Blue Gene/L ont été mobilisés avec une occupation mémoire de 336 Mo chacun ce qui fait un total d'environ 2,8 To. Afin de couvrir les 22 millions de neurones, SPLIT use de 8 supercalculateurs Blue Gene/L [4].

Un autre outil de simulation basé sur l'étude individuelle des neurones a été proposé par Hines et al. dans l'article paru le 7 mars 2008. Il est composé de plusieurs bases de données stipulant le fonctionnement des canaux ioniques, les propriétés des membranes cellulaires, le modèle de structure adopté, le type de neurones constituant, la région à simuler et le neurotransmetteur en question. Il entre dans le cadre du programme NEURON v6.1. Pour un seul neurone, la simulation a été faite sur deux différents types de machines : Intel x86_64 dual-processor dual-core 3,2 GHz Dell Precision 490 et un SGI Prism Extreme avec 32 1,5 GHz Itanium2 processors et 300 Go de mémoire partagée. Pour une simulation de réseau entier de neurones, le superordinateur EPFL IBM Blue Gene/L à 8192 processeurs (770 MHz

PowerPC 440) a été utilisé. Les cellules de Purkinje du cervelet sont le centre de ces expérimentations [6].

2.3 Autres modélisations

Des modèles mathématiques du fonctionnement des neurones ou des réseaux de neurones ont été établis depuis l'année 2002 et regroupés dans des tutoriels utilisables pour des modélisations informatiques. Citons par exemple le modèle de Hodgkin-Huxley qui régit le passage des ions dans les canaux ioniques en prenant en compte des propriétés de la membrane cellulaire. Le Mathematical Biosciences Institute (MBI) de l'Université de l'Etat de Ohio publie de telles documentations pour servir de base mathématiques aux chercheurs en neurosciences computationnelles [2]. De même, le SIAM News, dans son volume 31, numéro 5 met en exergue deux modèles mathématiques du fonctionnement du cerveau à savoir le Markov Random Field (MRF) et le Gibbs Random Field (GRF) pour des processus de vision, d'apprentissage et de mémorisation [8].

Des essais de modélisations amateurs ont aussi vu le jour :

- le projet « GENESIS Neural Database and Modeler's Workspace » du GENESIS group : un prototype de base de données fait en MySQL avec des interfaces graphiques en Java. Il simule la conductance ionique [19] ;
- Neurofit est un programme fait sur Matlab dans le but de visualiser les variations de tensions au niveau des membranes cellulaires [1].

D'autres institutions ont aussi fait leur preuve en utilisant le Blue Gene/ L : l'Université du Nevada en est une. Simulation du cortex de souris : 16 millions de neurones avec 8000 connexions par neurone. Les expériences ont été menées avec le respect des contraintes temporelles, moyennant un facteur multiplicatif constant [3].

3 Modélisation

3.1 Cerveau

Les fonctions mentales sont latéralisées dans le cerveau. Il semblerait que l'information prend plusieurs trajets dont la plupart n'aboutit pas. Le premier essai de réponse est le suivant : un retard de réaction venant d'un des deux hémisphères contraint l'autre à réagir et à prendre une décision unilatérale d'où l'existence de certains troubles de la perception. En règle générale,

l'hémicorps gauche est contrôlé par l'hémisphère droit du cerveau et inversement. Seul l'odorat échappe à cette règle [15].

Ci-dessous une carte représentant les compartiments fonctionnels globaux du cerveau [14] :

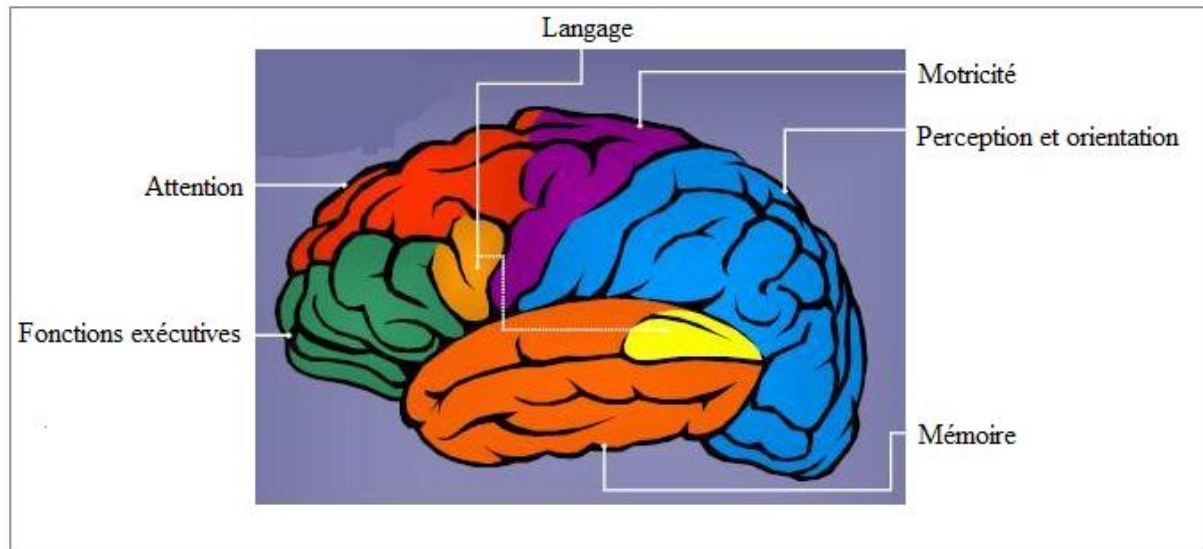


Figure 1 : Carte neuropsychologique du cerveau

Les données précitées mènent à une conception de type parallèle du fonctionnement du cerveau. L'idée est de concevoir un modèle pour représenter les fonctions d'apprentissage, de mémoire et d'exécution de mouvements. Pour cela, on admettra d'abord que le cerveau a une structure fonctionnelle bien distincte ; ce qui permet de considérer, qu'une place en RdP sera illustrative d'une aire du cerveau. Les transitions marqueront les passages interzones qui seront supposés instantanés. Les arcs relieront ces aires et leurs valuations dépendront de la pertinence de l'information débitée par les places en amont pour la réalisation de l'activité voulue : c'est-à-dire que plus le poids de l'arc est importante, plus les informations requises par la transition pour effectuer le franchissement sont nombreuses. Ce qui veut dire que les informations seront représentées par les marques. La temporisation se trouve alors affectée aux places. Les RdP du modèle de Van der Aalst ou ceux à flux temporels semblent adéquats à ce modèle. Pour les p-RdP, la notion de marques-mortes permet de simuler l'inutilité de certaines informations pour le franchissement d'une étape.

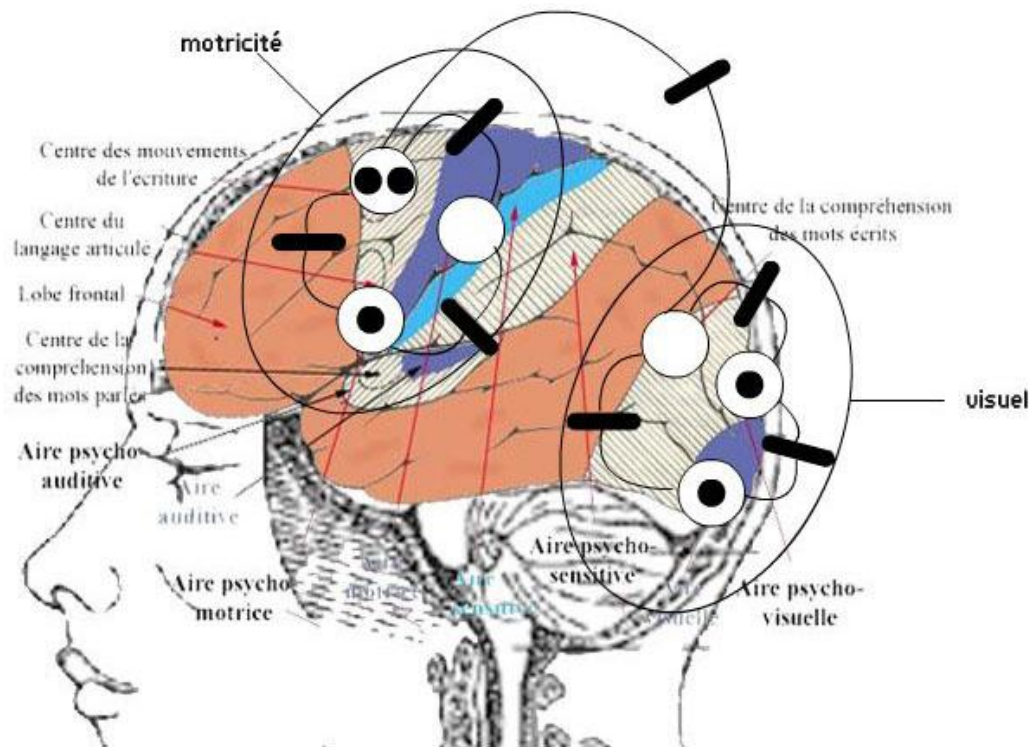


Figure 2 : Mouvement d'écriture modélisé par un RdP

Le problème rencontré lors de l'essai de modélisation se rapporte surtout sur la latéralisation du fonctionnement du cerveau. De plus, compartimenter le cerveau est une hypothèse simplificatrice qui a tendance à devenir une vérité, mais des microstructures faussent cette théorie. Du côté RdP, l'absence de sens précis du flux de contrôle entre les parties du cerveau ne permettent pas encore d'aboutir à un graphe orienté. Néanmoins un RdP non orienté qui garderait les propriétés d'un RdP orienté pourrait régler le problème.

3.2 Cortex

Une interprétation du mode opératoire du cortex préfrontal et du ganglion basal est qu'ils fonctionneraient comme un ordinateur selon l'avis de O'Reilly, formulé dans un article paru le 6 octobre 2006 dans Science : « Les neurones du cortex préfrontal sont binaires - ils ont deux états, actifs ou inactifs - et le ganglion basal est essentiellement un gros commutateur qui permet de permuter dynamiquement différentes parties de ce cortex ». Le cortex préfrontal est le centre exécutif du cerveau et supporte la cognition, la résolution de problèmes et la prise de décision. Cette partie du cortex est donc un réseau social élargi par les caractéristiques de type binaire sus mentionnées. Ce qui confère au cerveau sa flexibilité dans le traitement d'informations symboliques nouvelles [11].

Pour le cortex moteur, l'organisation en couche reste encore valable mais on observe une certaine fragmentation fonctionnelle. Les premières notions d'organisation corticale de la motricité furent apportées par John Hughlings Jackson au cours du 19^{ème} siècle. Les résultats de stimulations électriques faites par Penfield et Boldrey durant des opérations neurochirurgicales chez l'humain évoquent des cartographies fonctionnelles groupées dans l'homunculus de Penfield présenté avec Ramsussen en 1950 [5].

Les principales régions motrices du cortex se démarquent par leur couche granuleuse (IV) qui est très mince, voire absente. Dans ces aires, la couche V est particulièrement importante. Les dendrites des cellules pyramidales de chaque couche fournissent au cortex de solides connexions verticales en colonnes corticales. À l'intérieur de ces colonnes, les cellules partagent des connexions d'entrée et de sortie communes. En plus de ces connexions verticales, il existe également de fortes connexions horizontales entre les colonnes. Dans les couches II et III (et IV dans les autres aires corticales), les cellules pyramidales forment des plexus dendritiques. Les axones des cellules pyramidales de la couche V eux aussi envoient des collatérales récurrentes avant de pénétrer dans la matière blanche [5].

Vu que le néocortex est constitué de six couches qui sont connectés entre eux verticalement et horizontalement et que la communication de commande de haut en bas et de bas en haut se fait d'une manière parallèle, l'utilisation de RdP pour traduire ce parallélisme peut donc constituer une approche de la modélisation du cortex. La proposition est : une couche d'une colonne sera prise comme une place, l'interface entre couche sera représentée par une transition, le nombre de neurones qui sont en mesure de décharger leur neurotransmetteurs est égal au nombre de marques dans la place. Les arcs détermineront les cellules nerveuses qui seront aptes à effectuer le tir. Cette colonne corticale sera reliée à d'autre via une imbrication du réseau précité.

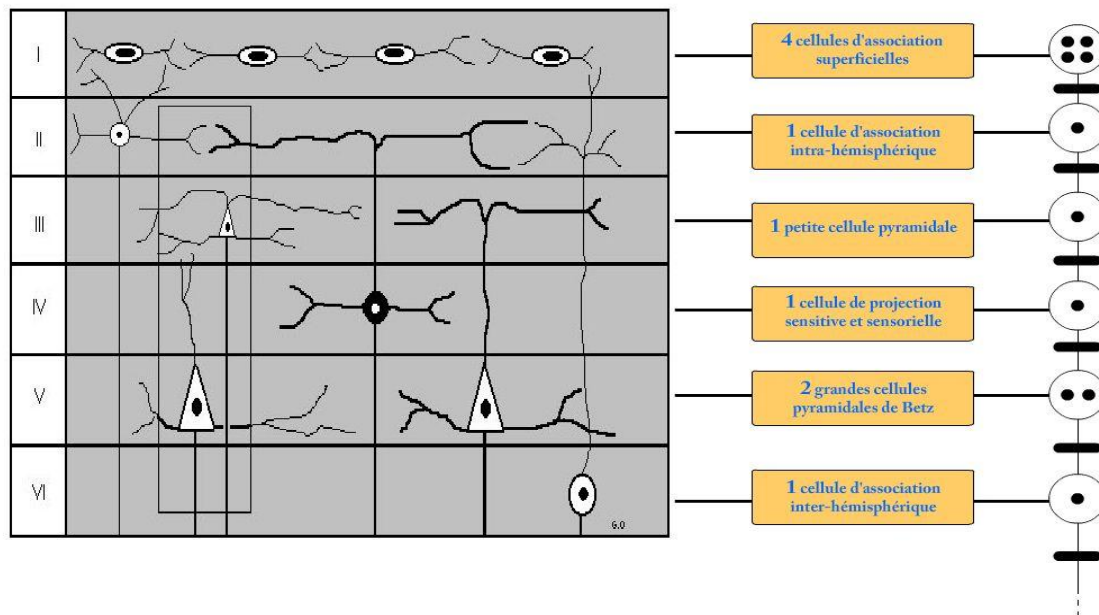


Figure 3 : Analogie entre couches du cortex et RdP

Les questions se rapportant aux fonctions des différentes couches du cortex n'ont pas encore été bien élucidées, plus précisément celles des cellules constituant chacune d'elles. Ceci limite la possibilité de prendre en compte l'ensemble des neurones d'une strate pour former une unité mais aussi crée une ambiguïté en considérant une à une ces cellules et leurs relations au sein d'une même couche.

3.3 Neurone

Les neurones communiquent entre eux via des combinaisons de signaux électriques [16] ; le signal émis étant fonction de la somme des signaux reçus [7]. Au repos, un potentiel permanent d'une valeur de -75 mV à -65 mV existe entre les deux faces de la membrane d'un neurone (l'intérieur étant électronégatif) [16] [13]. Le nombre de potentiel d'action (inversion brutale de polarisation de la membrane) par unité de temps caractérise l'intensité d'un stimulus [16] [20].

Réellement, au niveau d'une synapse, le neurone émetteur lâche des neuromédiateurs qui vont se fixer sur le bouton synaptique du neurone récepteur. Un certain seuil quant au nombre de molécules fixées déclenche un signal électrique d'où la transmission [7] [13]. L'action d'une synapse peut cependant être inhibitrice ou excitatrice [7] [20]. Le nombre moyen de synapses excitatrices doit dépasser 40 pour provoquer le déclenchement [20]. L'ouverture des canaux Na^+ est la cause de la polarisation inverse, et l'ouverture d'un canal K^+ permet de ramener au

potentiel de repos : c'est la période réfractaire [13]. Signalons que le récepteur ne s'ouvre que si la molécule du neurotransmetteur est le bon [17].

Le modèle qui débouchera de cette représentation sera l'équivalent des réseaux de neurones. Le soma est assimilé à une place qui emmagasine les charges venant des neurones en relation avec celui considéré. Ces charges électro-chimiques constituent le jetons et un nombre suffisant de charge permet la traversée d'une synapse, d'où la notion de poids de l'arc. De même, l'incidence après sert à définir le nombre de potentiel d'action qui stimulera le neurone en aval de l'espace synaptique.

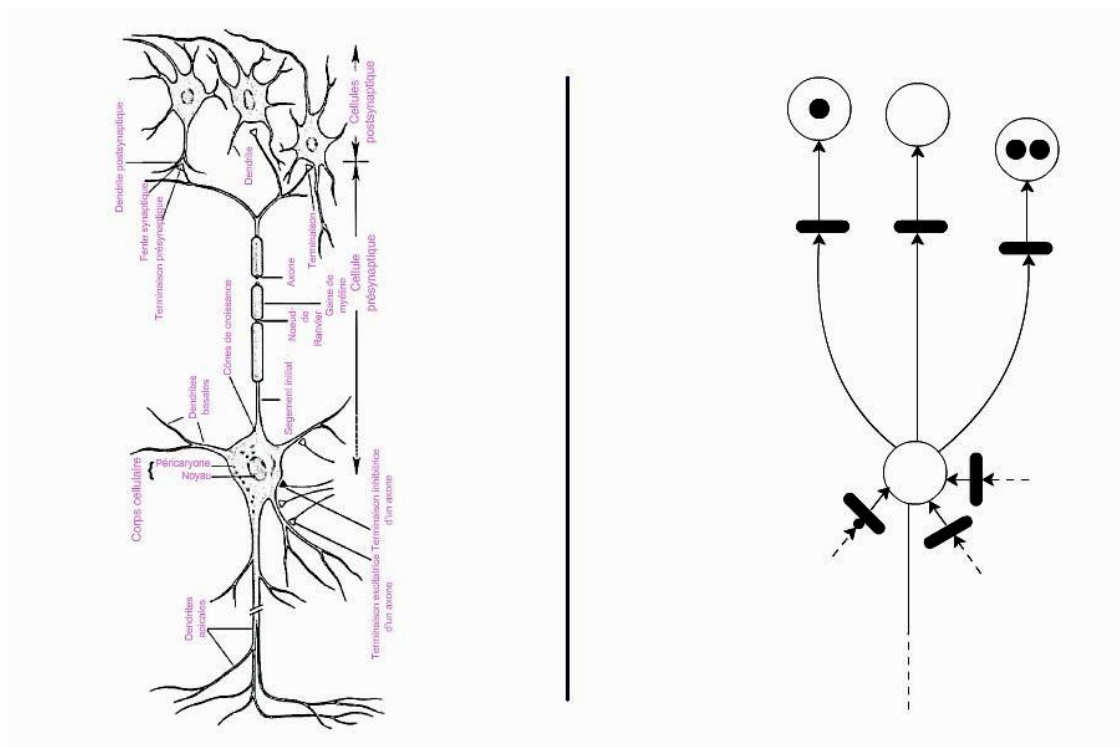


Figure 4 : Relation neurone/neurone modélisé par un RdP

La difficulté est de savoir le seuil à partir duquel une synapse effectue le transfert de l'influx nerveux. La sélectivité complique la modélisation car la réaction des neurones à tel ou tel neurotransmetteur sera diversifiée donc une généralisation est non faisable : il faut prendre au cas par cas. Une contradiction survient aussi quant à la notion d'arc inhibiteur : en RdP c'est l'absence de marques en amont qui le caractérise ; pour les réseaux neuronaux l'effet de l'inhibition se fait sentir au niveau du neurone en aval mais des neurotransmetteurs sont toujours libérés.

4 Conclusion

L'organe le plus méconnu de notre corps est le cerveau. Tout système vivant évolué possède un cerveau mais celui de l'homme diffère par la présence du cortex qui lui confère les facultés de langage, de cognition, de perception, d'imagination, en gros, de conscience. Les terminaisons nerveuses se situent dans les organes sensitifs et sensoriels ; ils sont les sources et les points de sortie des commandes générées par le cortex. Les prolongements des neurones assurent cette fonction de transmission. Les systèmes ayant des variables qui évoluent de manière discrète usent des réseaux de Petri pour effectuer leurs modélisations. Ces derniers présentent la possibilité de considérer la synchronisation et la notion de durée. Blocage, vivacité et bornitude sont les principales caractéristiques qui régissent les RdP. La carte corticale étant variable selon les individus et leurs expériences personnelles, la représentation que chacun a du monde extérieur en est tout aussi différencié. Pour comprendre le fonctionnement des réseaux neuronaux (biologiques), du cerveau, des couches du cortex, les neuroscientifiques computationnelles tentent de créer des modèles de références. Le modèle généré sera le premier pas vers la construction matériel ou logiciel des liaisons fonctionnelles régissant le cerveau humain. La modélisation fonctionnelle du cerveau est basée sur les cartographies existant depuis les années 1937. L'aube du développement informatique contraint le milieu médical à générer des modèles apte à suivre cette évolution. Plusieurs laboratoires y travaillent.

5 Références

[1]	Allan W., « <i>neurofit</i> », http://www.uoguelph.ca/~awillms/neurofit/ , mai 2004.
[2]	Borisyuk et al., « <i>Tutorial in Mathematical Biosciences I</i> », http://lib.org.by/info/B_Biology/Borisyuk A., B.G.Ermentrout, A.Friedman, D.Terman. Tutorials in Mathematical Biosciences.. Mathematical Neuroscience.. v. 1 LNM1860, Springer,2005/ISBN 354023858.178s/_B_.pdf , Lecture notes in Mathematics, août 2004.
[3]	Christophe J., « <i>simulation d'un cortex de souris sur un super-calculateur ?</i> », http://www.automatesintelligents.com/labo/2007/mai/simulationcortexsouris.html , Automates intelligents, mai 2007.
[4]	Djufeldt et al, « <i>Massively parallel simulation of brain-scale neuronal network models</i> », http://www.bgconsortium.org/news/Past_Results/kth

	<i>bgwreport06.pdf</i> , Blue Gene Watson Consortium Days, octobre 2006.
[5]	Ethier C., « <i>Propriétés fonctionnelles et organisation du cortex moteur chez le chat</i> », Faculté de Médecine Université Laval Québec, 2007.
[6]	Hines et al., « <i>Fully implicit parallel simulation of single neurons</i> », http://www.neuron.yale.edu/neuron/static/papers/split/multisplit.pdf , Yale University et EPFL, mars 2008.
[7]	Mansour S., « <i>Réseaux de Neurones, une introduction</i> », http://www.lirmm.fr/~terrat/ENS/EDI/TER2007/26 - <i>Les reseaux de neurones – SALJOQI Mansour.pdf</i> , Université des sciences de Montpellier, mars 2009
[8]	Martin et al., « <i>Cooperativity and parallelism in mathematical models of brain function</i> », http://www.siam.org/pdf/news/99.pdf , SIAM news, volume 31, numéro 5, 1998.
[9]	Michel D., « <i>Le cerveau humain copié</i> », http://apeis-du-cher.over-blog.fr/36-index.html , Apies, août 2007.
[10]	Michel G., « <i>Le projet Blue Brain de l'EPFL: vers une reproduction du cerveau humain</i> », http://www.invention.ch/revue-de-presse/2008/epfl-blue-brain.htm , La Revue Polytechnique, janvier 2008.
[11]	Michel, « <i>Une partie de notre cerveau fonctionnerait comme un ordinateur.htm</i> », http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=3255 , Vie et Terre, octobre 2006
[12]	Nassim, « <i>La modélisation du cerveau est possible selon les Suisses</i> », http://www.algerie-dz.com/forums/showthread.php?t=65135 , Forum Algérie, décembre 2007.
[13]	Saïghi S., « <i>Circuits et systèmes de modélisations analogiques de réseau de neurones biologiques : application au développement d'outils pour les neurosciences computationnelles</i> », http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/32/60/05/PDF/2004_These_Saighi.pdf , Université Bordeaux I, soutenu le 29 novembre 2004.
[14]	« <i>carte neuropsychologique du cerveau</i> », http://www.institutsmq.qc.ca/publications/materiel-didactique/ , GENeP, 2004
[15]	« <i>deux hémisphères</i> », http://www.journaldunet.com/science/biologie/dossiers/06/0602-cerveau/6.shtml , l'internaute science, 2009.

[16]	« <i>La communication nerveuse</i> », http://www.crdp-montpellier.fr/ressources/RD/SVT/.._CSV_T_CCCAR_CCCar07_CCCar07.pdf , juillet 2009.
[17]	« <i>Le fonctionnement d'une synapse</i> », http://www.journaldunet.com/science/biologie/dossiers/06/0602-cerveau/5bis.shtml , l'internaute science, 2009.
[18]	« <i>Les mystères du cerveau prêts à être percés</i> », http://www.amge.ch/2007/11/27/les-mysteres-du-cerveau-prets-a-etre-perces/ , Association des Médecins du canton de Genève, novembre 2007.
[19]	« <i>Modelers Workspace Channel Database</i> », http://www.genesis-sim.org/hbp/channeldb/ , GENESIS, 2007.
[20]	« <i>neurones et synapses</i> », http://www.journaldunet.com/science/biologie/dossiers/06/0602-cerveau/5.shtml , l'internaute science, 2009.