MODELISATION INFORMATIQUE DU CERVEAU HUMAIN

LE JEUNE MICHAËL - MARTIN JONATHAN - RODRIGUEZ LAURENT

17 mai 2006

Table des matières

I Introduction **1**

II Stimuli **5**

1 Les sens et leurs équivalents technologiques **9**
1.1 La vue . . . 9
1.2 L'ouie . . . 10
1.3 Les autres sens . . . 11

2 Le mécanisme de transmission de l'information **13**
2.1 Le neurone biologique . . . 13
2.2 Exemple de transmission : la motricité . . . 14

3 Les différentes « visions » du cerveau **17**
3.1 La théorie du cerveau-machine . . . 17
3.2 La théorie de Vernon Mountcastle . . . 18

III Analyse **21**

4 Introduction **23**

5 Théorie de Vernon Mountcastle **25**
5.1 Hiérarchie neuronale . . . 25
5.2 Mémoire prédictive . . . 26

6 Les reseaux de neuronnes en général **29**
6.1 Généralités . . . 29
6.2 Principales sortes de réseaux . . . 29
6.3 Quelle est l'utilité du réseau de neurones ? . . . 30

7 Les réseaux non bouclés - *feed forward* **31**
7.1 Présentation . . . 31
7.2 Exemple de réseau non bouclé multicouches . . . 31
7.3 Application du feedforward : le Perceptron . . . 31
7.3.1 Présentation : un peu d'histoire... . . . 31
7.3.2 Composition du perceptron . . . 32
7.3.3 Explications . . . 32
7.3.4 Apprentissage du perceptron . . . 32

8 Les réseaux bouclés / réentrants **35**

9 Etude d'un cas simple : le réseau neuronal de Mc Culloch-Pitts **37**
9.1 Présentation . . . 37
9.2 Fonctions booléennes simples . . . 38
9.2.1 Fonction OU . . . 38
9.2.2 Fonction de filtre . . . 38
9.2.3 Fonction ET . . . 39
9.2.4 Fonction NOT . . . 39
9.3 Application à un exemple . . . 39
9.3.1 Présentation du problème . . . 39
9.3.2 Table de vérité . . . 39
9.3.3 Résultat avec un réseau non-bouclé . . . 40
9.3.4 Résultat avec un réseau bouclé . . . 40
9.4 Conclusion . . . 40

10 Apprentissage des réseaux de neurones **43**
10.1 Au départ de l'apprentissage . . . 43
10.2 les différents niveaux d'apprentissage . . . 43
10.3 Implémentation de l'apprentissage . . . 44

11 Système expert et Système mutli-agents **45**
11.1 Système expert . . . 45
11.2 Système Multi-agents . . . 46
11.2.1 Définitions . . . 46
11.2.2 exemples de puissance et application . . . 46

IV Conclusion **47**

12 Applications **49**
12.1 Application militaire . . . 49
12.2 Jeux Vidéos . . . 49
12.3 Robotique . . . 50
12.3.1 En quête d'intelligence . . . 50
12.3.2 Le Mouvement . . . 50
12.3.3 Perception . . . 51
12.3.4 Esprit d'équipe . . . 51

13 Un futur par si lointain... **53**

V Références **55**
13.1 Bibliographie . . . 57
13.2 Les sources web . . . 57

Première partie

Introduction

Depuis longtemps, l'homme a toujours voulu jouer à Dieu en créant. Pour être plus précis, l'homme veut créer un « être » doué d'intelligence : « à son image ». Mais ce concept étant abstrait, l'homme a du mal à le définir précisement. De plus, si l'homme veut se copier, il doit se connaitre. Et là aussi, l'homme a bien du mal.

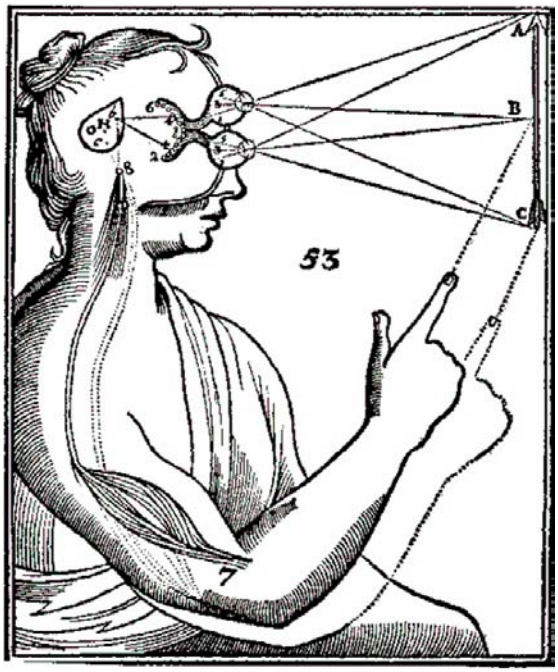
Parlons du « pilote », le cerveau humain : il reste encore un mystère. Mais, l'homme n'a de cesse de s'y intéresser et de trouver des théories sur son fonctionnement. Nous nous proposons d'axer notre étude sur l'utilisation de ces théories pour la modélisation informatique du cerveau humain. Ce sujet étant assez vaste, nous allons nous axer sur l'action-réaction. Un ou plusieurs stimuli, via un mécanisme interne, engendre une ou plusieurs réactions de la part du cerveau - et par extension du corps.

Nous allons donc voir les aspects de stimuli et de mécanismes internes. Cette étude portera surtout sur les parralèles biologie / technologie et tout ce que l'homme a mis, met et mettra en place pour, peut-être, créer une intelligence artificielle indépendante.

Deuxième partie

Stimuli

En premier lieu, il faut savoir ce que l'on entend par stimuli. Ici, nous allons avoir trois principaux axes de plus en plus « internes ». Tout d'abord, nous constaterons les sens des êtres vivants (principalement l'homme) et les tentatives pour les imiter et les améliorer. Puis, nous nous pencherons sur comment une information extérieure peut devenir intérieure. Enfin, nous verrons que les avis concernant la structure et le fonctionnement du cerveau sont loin d'être arrêtés. En bref, nous allons voir ce que l'on pourrait appeler les « entrées » du cerveau.



VISION Rene Descartes 1644

Chapitre 1

Les sens et leurs équivalents technologiques

Avant toute chose, il faut regarder comment nous interagissons dans notre environnement. Nos premiers capteurs sont nos sens. Nos bons vieux cinq sens. Mais, alors que leur utilisation nous est innée, leur reproduction n'est pas si simple. Quelques exemples pour vous en persuader.

1.1 La vue

L'un des sens le plus utilisé - si ce n'est le plus utilisé - est la vue alors regardons de plus près comment procède l'oeil pour 'voir'. Biologiquement parlant, l'oeil possède une zone d'ombre appelée tâche aveugle qui correspond au passage des nerfs et qui est paliée par le deuxième oeil.

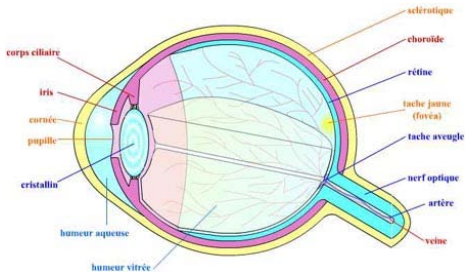


Fig. 1.1 – Structure de l'oeil

Pourtant, lorsque nous fermons un oeil, nous ne distinguons aucun « trou » dans notre vision. Comment expliquer cela ? Une explication est que l'oeil effectue des micromouvements très rapides (environ 3 par seconde). Cette explication semble pertinente mais, malgré cela, le cerveau ne pourrait traiter autant d'informations s'il ne les sélectionnait pas - dû à notre physiologie - mais nous verrons cela plus loin.

Maintenant, vient la question comment repoduire le fonctionnement de l'oeil ? La première idée, au vue de la technologie actuelle, est le principe de la caméra numérique qui reçoit des images et les transforme en pixels, similaires aux cellules photoréceptrices de l'oeil. Mais l'analyse de comparaison ou d'identification est bien trop longue, malgré tous les algorithmes à notre disposition. Le cerveau ne pouvant gérer une quantité trop grande d'informations, la suggestion de la caméra n'est pas la plus performante. Les différentes études et recherches dans ce domaine n'en est pas moins inutiles. Cela permet, entre autres, d'améliorer la vision (lunettes, jumelles, téléscopes, lunettes amplificatrices de lumière, thermovision,...) ou de la créer, pour les malvoyants principalement.

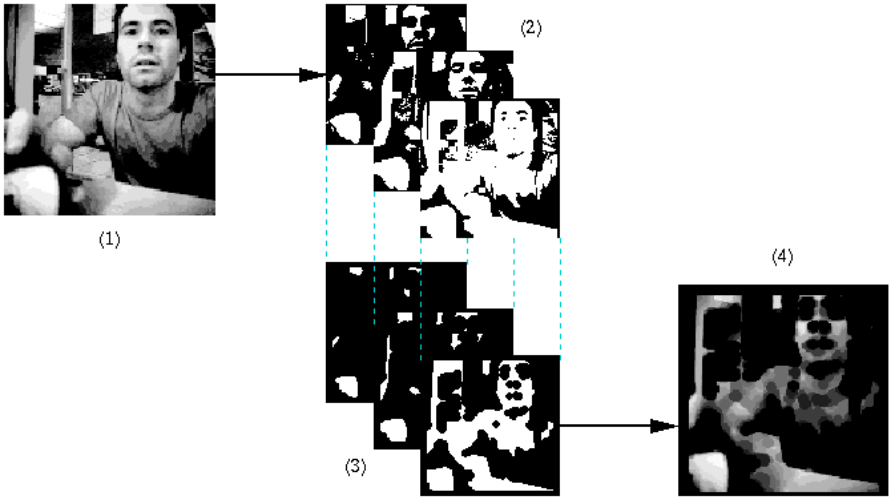


FIG. 1.2 – Vision à l'aide d'une rétine artificielle

1.2 L'ouie

Prenons un autre sens : l'ouie. Les ondes sonores sont reçues par la cochlée, une partie de l'oreille interne, où elles font vibrer celle-ci différemment en fonction du son.

FIG. 1.3 – Fréquence de vibation de la cochlée

Depuis longtemps, nous avons la technologie pour enregistrer, reproduire et restituer le son. Le souci est de l'analyser. Nous savons décortiquer le son, le rendre sous forme d'onde, de fonction(s) mathématique(s) mais là encore la « dissection » de l'onde complexifie l'analyse future de ce signal d'entrée.

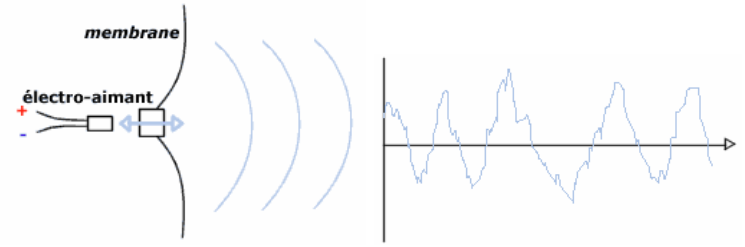


FIG. 1.4 – Emission de son - Spectre de modulation d'amplitude

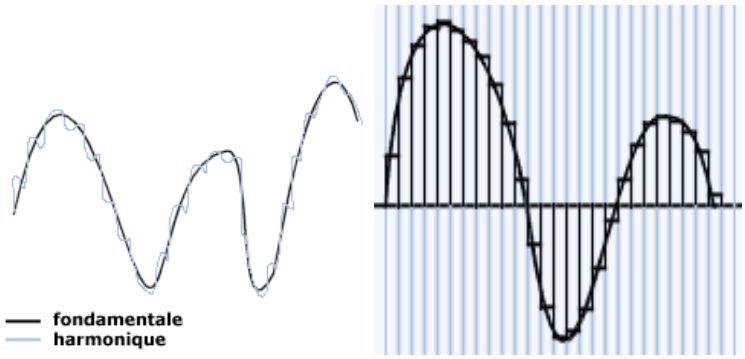


FIG. 1.5 – Sonogramme (de fréquences) - Numérisation

L'étude du son - de sa structure à sa génération - a permis d'aider beaucoup de personnes malentendantes. La première étape a été, là encore, l'amplification des signaux (dans ce cas, amplifications sonores) qui est maintenant coutumier. Nous savons aussi enregister, digitaliser, numériser des sons. Mais la reconnaissance du son est un peu plus hardue, même si nous avons des logicielles de reconnaissance vocale de plus en plus performants, ils restent encore très spécialisés en « mémorisant » une voix à la fois - contrairement à l'homme qui reconnait un mot, peut importe qui le dit.

1.3 Les autres sens

Le but de l'étude n'étant pas de faire une liste détaillée des sens et de ses technologies associées, nous allons juste en parler brièvement ici.
Le toucher a une particularité. En plus, de divers capteurs thermiques, ce sens a besoin du mouvement contre une surface, une texture, un objet pour reconnaître ce que l'on touche.
Une petite expérience : au moment de vous coucher, plongez votre main dans

un seau de gravier(par exemple). Au matin, à part en utilisant votre mémoire ou en bougeant votre main, vous ne saurait pas ce que touche votre main.
Cette petite expérience montre que le sens tactile « pur » ne permet pas de savoir ce que l'on touche, il faut le mouvement (et la mémoire). Ce qui en résulte que les palliatifs technologiques doivent faire et font de même. Les écrans tactiles en sont des exemples.

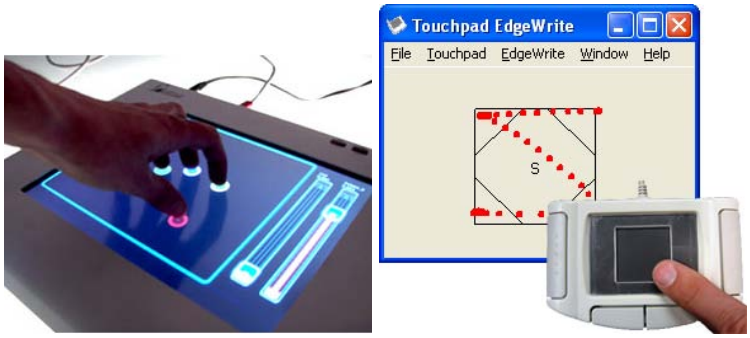


FIG. 1.6 – Divers écrans tactiles

Pour les sens olfactif et gustatif - qui sont étroitement liés - peuvent aussi être remplacés par des capteurs de molécules qui analyseront chimiquement la structure (par reconnaissance ou analyse complète) de celles-ci. Un exemple très simple : les capteurs de fumée (ils captent des molécules constituantes de la combustion).

Nous nous sommes aussi surtout contentés de regarder les cinq sens « humains » mais si nous examinons la nature, de nombreux animaux développent d'autres sens - à l'instar de la chauve-souris qui « voit » (sens visuel ?) par son sonar à ultrasons (sens tactile et sonore !). Tout cela pour montrer que ce que l'on appeler sens n'est en fait que réception d'informations du monde extérieur. Comment cela fonctionne-t-il est un grand pas vers la création de systèmes intéractifs avec l'extérieur et, par conséquent, vers la découverte - et la « socialisation » ! ?

Chapitre 2

Le mécanisme de transmission de l'information

Un stimuli est un flux nerveux provenant d'un neurone sensoriel excité. Par exemple la lecture d'une phrase. L'oeil capte la lumière qui est transformée en influx nerveux transmis par les axones des « glanglions nerveux » de la rétine. Apres une première connexion dans le thalamus, la stimulation sensorielle parvient à l'aire visuelle primaire où elle est décodée. L'information résultante sera ensuite transmise à l'aire de Wernick (responsable de la compréhension des mots) et à l'aire de Broca (analyse syntaxique) où elle sera comparée aux informations de même nature déjà stockées en mémoire.

D'un point de vue cellulaire, le cerveau est constitué de deux types de cellules : les neurones et les cellules gliales. Nous nous concentrerons ici sur les neurones, les cellules gliales étant surtout présentes pour veiller au bon fonctionnement des neurones.

2.1 Le neurone biologique

Les neurones sont des cellules spécialisées composées d'un corps appelé péricaryon et de fibres nerveuses. Le péricaryon est le lieu des fonctions vitales du neurone, il contient le noyau et produit l'énergie nécessaire au potentiel d'action. Les fibres nerveuses sont de deux types : l'axone et les dendrites. Les dendrites sont les portes d'entrée des neurones. Ce sont elles qui reçoivent les signaux émis par d'autres neurones ou par des récepteurs sensoriels. Grâce à l'axone, le signal résultant peut être transmis à d'autres neurones. Chaque neurone comporte à peu près une centaine de dendrites. L'axone, unique pour chaque neurone, de taille variant d'un milimètre à plus d'un mètre, conduit l'influx nerveux du péricaryon vers d'autre neurones ou vers d'autres types de cellules (comme celles des muscles ou des glandes). Pour penser, pour ressentir des sensations, pour réagir rapidement, les neurones doivent constamment transmettre des influx nerveux. La propagation de cet influx nerveux est à la base du fonctionnement

des neurones, du traitement de l'information. Elle commence à partir du cône d'émergence, à la base du péricaryon, qui fait la somme des potentiels gradués provenant des synapses situés le long des dendrites et sur le corps cellulaire. Si cette somme dépasse le seuil d'excitabilité du neurone un message nerveux est relayé par l'axone.

Il existe differents types de neurones, on distingue d'un point de vue fonctionnel :

- les neurones sensoriels qui captent les messages des récepteurs sensoriels et les communiquent au système nerveux central.

FIG. 2.1 – Voici un neurone sensoriel

- les neurones moteurs qui conduisent la commande motrice du cortex à la moelle épinière ou de la moelle aux muscles.

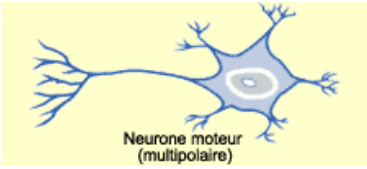


FIG. 2.2 – Ceci est un neurone moteur, responsable de l'envoie d'information au reste du corps

- les interneurones qui connectent entre eux différents neurones à l'intérieur du cerveau ou de la moelle épinière.

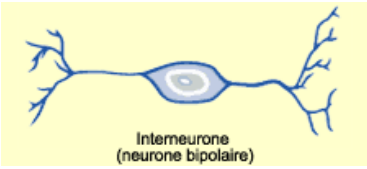


FIG. 2.3 – Et enfin l'interneurone, responsable de la transmission d'informations

2.2 Exemple de transmission : la motricité

Les structures cérébrales impliquées dans la motricité sont nombreuses. Certains vont même jusqu'à dire que c'est pratiquement tout le cerveau qui participe au mouvement. Car, même si le cortex moteur est habituellement associé

aux aires postérieures du lobe frontal, le contrôle du mouvement volontaire implique en réalité presque toutes les aires du néocortex. Reprenons l'exemple de la lecture d'une phrase. Après avoir interprété le stimulus visuel en information représenté par la phrase, l'hippotalamus envoie cette information vers le cortex moteur qui se charge de faire fonctionner tous les muscles responsables de la parole.

FIG. 2.4 – Photographie de neurones

Chapitre 3

Les différentes « visions » du cerveau

Nous venons de voir les différents capteurs extérieurs et le cheminement de leur information jusqu'au cerveau. Avant de voir précisemment comment modéliser le cerveau, il faut savoir sa structure générale, son fonctionnement. Là se pose un problème. Comme le cerveau n'a pas entièrement révélé son mystère, les scientifiques ont plusieurs hypothèses. Nous allons vous en exposer deux. La première étant l'une des plus ancienne - se basant sur les méthodes expérimentales classiques -, l'autre est une hypothèse qui paraît hautement plus probable - mais reste néanmoins une hypothèse et non une théorie.

3.1 La théorie du cerveau-machine

La méthode scientifique - apprise depuis longtemps dans nos écoles, collèges, lycées, universités - amène à regarder attentivement chaque cas d'expérience, à décortiquer tous les éléments, à expliquer toutes les exceptions. Alors que la structure biochimique du cerveau est connue (influx nerveux par réactions électrochimiques), sa répartition interne reste, quant à elle, encore obscure. Jusqu'à peu, les neurobilogistes s'attardaient à comparer chaque zone du cerveau et à en faire une immense carte « routière ».

L'idée générale est que chaque zone, chaque partie, chaque groupe de neurones ont une fonction bien particulière, voire unique. De part leur localisation, leur irrigation et leurs connexions, les scientifiques ont sorti une multitude d'hypothèses. Pour résumer quelques principes récurrents, le cerveau humain est un super-calculateur. Capable, grâce à tous ses systèmes neuronaux (à la fois indépendants et interconnectés) d'effectuer plusieurs calculs complexes à la fois, de résoudre des équations insolvables mathématiquement, de gérer un nombre « effrayant » de paramètres,... En bref, le super-ordinateur. Mais là où une majorité de chercheurs s'accordent à dire cela, ils ne parviennent pas à se mettre d'accord sur son fonctionnement interne : où est « stockée » la mémoire ? Où se trouve la super-calculatrice ? Les recherches informatique, électronique et algorithmique - entre autres - proposent quelques solutions comme les neurones « informatiques » (que nous verrons dans un autre chapitre).

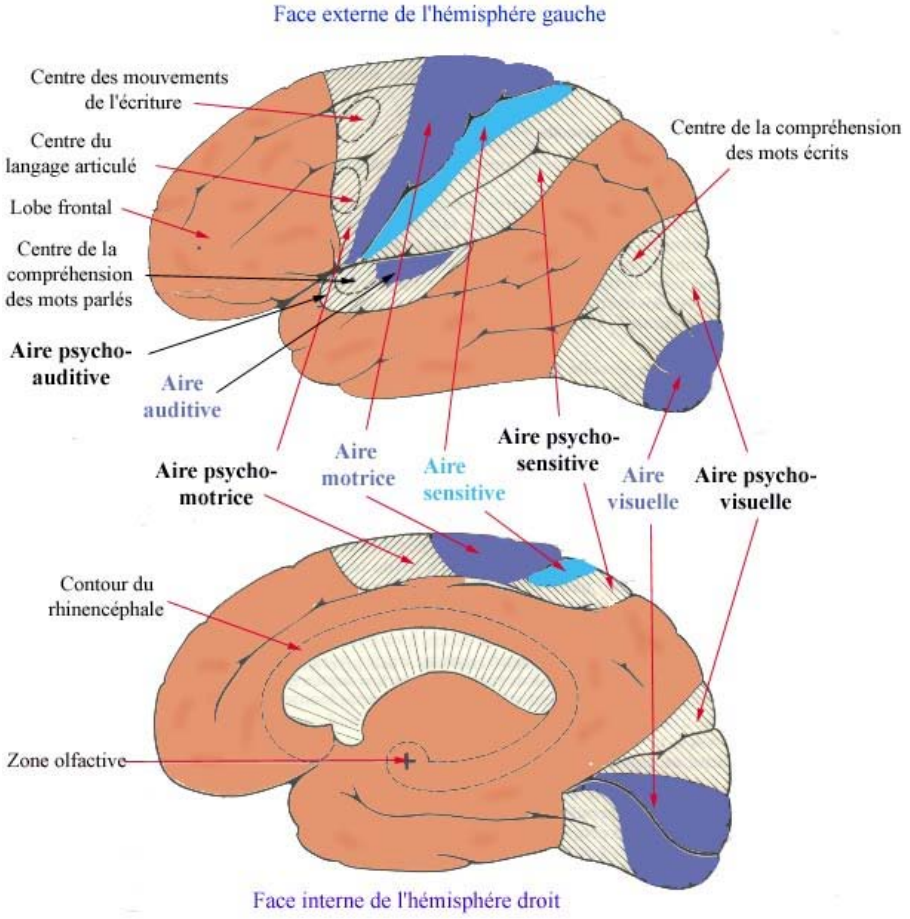


FIG. 3.1 – Les grandes zones du cerveau humain

3.2 La théorie de Vernon Mountcastle

Le deuxième courant est en fait une hypothèse de théorie, celle du neurobiologiste Vernon Mountcastle. Elle prend comme base que les parties du cerveau ne sont pas si spécifiques que l'on croit. En effet, certaines parties du cerveau sont bien différentes (il faut vraiment être aveugle pour confondre l'encéphale du néocortex). Mais alors que certains scientifiques accentuent leurs recherches sur les plus infimes différences de tel et tel parties d'une même région, V. Mountcastle soutient l'idée que les zones spécifiques du néocortex - réel pilote du cerveau - ont une uniformité bien réelle. En effet, à l'instar d'un ordinateur et de ses composants, le néocortex possède plusieurs couches, plusieurs zones, plusieurs systèmes neuronaux bien délimités. Mais si on regarde de plus près un ordinateur, chaque composant est unique (il y a toujours une imperfection de fabrication qui le rend unique vis-à-vis des autres). Il en est de même pour le néocortex. D'où l'hypothèse de Mountcastle qui précise que toutes les zones du néocortex ont les mêmes 'outils', les mêmes « fonctions ». Elles se différencient entre elles par les connections d'entrée. La zone servant à la gestion de l'ouie

est similaire à celle gérant la vue, par exemple. La question qui se pose maintenant est donc, comment le cerveau, plus précisement, le néocortex et ses zones gèrent-ils des stimuli qui sont en fait qu'un potentiel électrique ? C'est une des grandes énigmes que nous livre le cerveau et que nous étudierons par la suite. Il faut, cependant, prendre en compte un détail. Le cerveau reçoit non pas une information globale de l'extérieur mais des motifs, des schémas, des « patterns ». Ce sont ces patterns qui sont analysés par comparaison et non l'information globale. Bien entendu, l'information globale est découpée en patterns. Mais nous reviendrons sur cela un peu plus tard.

Troisième partie

Analyse

Chapitre 4

Introduction

Le cerveau humain est très complexe aussi bien en termes de connexité que de ses capacités. Si on veut faire un parallèle entre l'ordinateur et le cerveau, il faut savoir que l'ordinateur est plus de 1000 fois plus rapide que le cerveau. Le problème qui restreint la modélisation est que l'ordinateur ne peut effectuer qu'une seule tâche à la fois, ou quelques unes dans le cadre d'un programme tournant sur plusieurs machines. Le cerveau, quant à lui, fonctionne moins vite mais possède l'avantage de pouvoir fonctionner de manière quasi-intégralement en continu (les neurones s'activent dans tous les sens, ce qui fait que des tas de données sont traitées en parallèle et en série).

Une des autres restrictions de l'ordinateur par rapport au cerveau, en dehors des différents aspects psychologiques non-traités dans cette partie, vient du fait que les programmes informatiques ont principalement un fonctionnement déductif alors que le cerveau marche en grande partie de manière inductive.

Dans cette partie, nous allons essayer de vous montrer la conception réalisée par les chercheurs afin de pouvoir modéliser quelque chose qui se rapproche du cerveau humain : les réseaux de neurones informatiques, les systèmes experts et les systèmes multi-agents.

Chapitre 5

Théorie de Vernon Mountcastle

Revenons sur l'hypothèse de Vernon Mountcastle. Elle se base principalement sur le principe de pattern. Les capteurs « sensitifs » reçoivent plusieurs informations du milieu extérieur. Ces informations sont reçues, directement ou non, par les neurones qui en fonction du message « informatif » et de leur fonction transmettent un autre message informatif (ou aucun d'ailleurs) à d'autres neurones et ainsi de suite jusqu'à ce que un neurone « chef » renvoie un message « moteur » - pour engendrer une réaction. Et là encore, le mécanisme est le même mais dans le sens inverse.

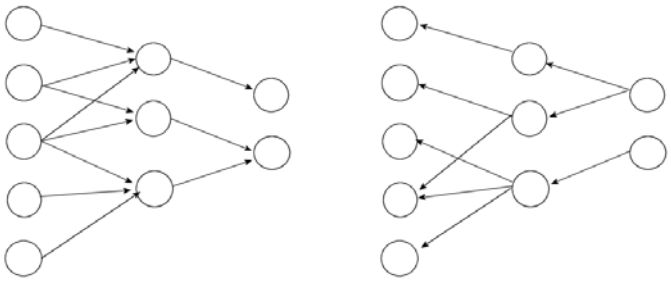


FIG. 5.1 – Transmissions du l'information - informative et motrice

Avec d'ailleurs, les mêmes neurones qui engendraient le message initial (ex : pour des mouvements occulaires) ou d'autres (ex : réaction de fermer les yeux quand la lumière est trop forte).

5.1 Hiérarchie neuronale

En regardant de plus près ce phénomène de déléguation, on se rend compte que tout le cerveau - et le néocortex - fonctionne ainsi. Il y a une hiérarchie entre les neurones mais aussi une hiérarchie entre les zones du cerveau. Ainsi,

dans le cortex, les aires inférieures (au sens de la hiérarchie) envoient des informations vers les aires supérieures (là aussi, au sens hiérarchique) à l'aide de patterns, tandis que les aires supérieures envoient un « feedback'[1] » aux aires inférieurs. Pour compléxifier tout ça, il existe aussi des connexions latérales entre hiérarchies séparées (ex : mélange des sens de l'ouie et de la vision pour savoir où se trouve un avion). La plus basse région fonctionnelle est celle des aires sensorielles primaires. Elle traite l'information au niveau le plus brut, le plus élémentaire.

> Par exemple, l'information visuelle pénètre dans le cortex par une aire visuelle primaire appelée V1, en abrégé. Elle est concernée par les fonctionnalités de vision de bas niveau comme celle des détails, la perception d'un mouvement faible, la disparité rétinienne (propre à la vision stéréoscopique), ainsi que la perception des informations chromatiques de base et le contraste. L'aire V1 fournit des informations à d'autres aires comme V2, V4 et IT, ainsi qu'à de nombreuses autres aires annexes. Chacune est concernée par un aspect plus spécialisé ou abstrait de l'information. Par exemple, les cellules V4 réagissent à des objets de compléxité moyenne comme des formes en étoile de couleurs différenciées. Une autre aire appelée TM est spécialisée dans le mouvement des objets. Les échelons plus élevés du cortex visuel sont des aires qui représentent notre mémoire visuelle de toutes sortes d'objets comme des visages, des animaux, des outils, des parties du corps,etc [2].

Ensuite, les informations sont reçues par des aires associatives (de plusieurs sens). Une mouche qui se pose sur votre bras peut être vue et sentie : le mélange des sens fait prendre conscience que la cause du chatouillement et la vision de la mouche est la même. Mais le fonctionnement de ces aires nous est encore très méconnu.

La hiérarchie « motrice » a un fonctionnement très proche du fonctionnement de la hiérarchie « informative ». Au détail près que l'information circule dans l'autre sens. En fait, il ne faut pas penser que l'information ne circule que dans un sens. En effet, chaque neurone envoie un feedback aux neurones emmeteurs du message de base. Ainsi toute le système neuronal est actif et connecté en permanence. La communication entre les neurones est toujours active.

5.2 Mémoire prédictive

Mais, après tout, l'information est de la forme d'un potentiel, on pourrait bien le comparer aux bits informatiques. Alors comment distingue-t-on la différence entre un ballon et un cri ? Là interviennent les patterns et le système de reconnaissance. Il faut se rendre compte que le transport, et par conséquent le traitement, de l'information se fait de neurone en neurone. Chaque neurone reçoit une information, la traite et y répond (au plus simple en transmettant l'information au niveau supérieur ou en « calculant » une réponse adéquat). Le

[1] message de retour au message reçu, un accusé de réception en quelque sorte.
[2] extrait de « Intelligence » de Jeff HAWKINS avec Sandra Blakeslee

traitement de l'information en devient donc sérielle. Mais jusque là, on pouvait s'en douter car, intuitivement, nous analysons les « choses » étape par étape. Un logiciel de reconnaissance sonore va d'abord enregistrer les variations du son puis en faire une courbe mathématique puis en sortir quelque chose d'utile par la suite.

Nous avions déjà spécifié que nos algorithmes étaient bien mauvais en comparaison avec les résultats humains. Alors ? L'idée de Mountcastle est que la reconnaissance des informations ne se fait pas par comparaisons mais par prédictions. Le cerveau s'attend sans cesse à avoir certaines informations. Si celles-ci n'arrivent pas, il s'interroge pour savoir ce qui ne va pas. Un petit exemple pour illustrer ce fait : l'expérience de la porte faussée. Par habitude, vous connaissez parfaitement votre porte d'entrée ou du moins votre cerveau la connait - son poids (en fait, votre réction quand vous l'ouvrez), la localisation de la serrure, sa géométrie,etc. Imaginez maintenant que pendant que vous êtes absent, je la modifie - je la rend plus légère, je monte la serrure de quelques centimètres, je modifie les gonds pour la pencher un petit peu,etc. Lorsque vous allez rentrer, quelque chose va vous paraître bizarre. Vous n'allez pas savoir de suite quoi mais très vite vous le saurez (en utilisant probablement votre mémoire). Cette exemple illustre parfaitement le fait que vous avez remarqué une anomalie et non un changement. Votre cerveau s'attendait à une porte particulière et se trouve en face d'une porte nouvelle.

En étudiant, plus biologiquement, ce phénomène, on se rend compte que les neurones sont actifs avant même de recevoir l'information. Le cerveau s'attend à recevoir une information, il prédit l'information reçue. Si le fait d'ouvrir cette même porte produit un son à chaque fois, l'ouverture silencieuse de celle-ci va « éxcité » le cerveau par une absence d'information. De même si, au contraire, la porte est silencieuse est devient bruyante, le cerveau va avoir une information supplémentaire non attendue. Le cerveau est, bel et bien, en constante attente d'information pour confirmer ou infirmer ses prédictions. Si la prédiction est confirmée, il continue. Sinon il active d'autres zones pour s'occuper de cette « sinistre affaire » (la mémorisation, par exemple).

Nous venons de voir donc que le système neuronal est sérielle mais que la « mémoire » est séquentielle. En effet, si les premiers neurones passent l'information (aucune anomalie), il se peut que quelques neurones plus loin dans la hiérarchie détectent une anomalie. Notre vision reconnait un oeil, puis un autre oeil. Les deux yeux sont bien reconnus mais selon leur disposition, il peut y avoir une anomalie comme le montre les figures 5.2.

Le cerveau utilise à tout niveau un système de mémoire auto-association (association des patterns) et non pas une mémoire de détails (tel une photographie). Ce système est bien plus simple et performant, tout à fait à l'image de ce qu'à fait la nature. A nous, les humains, si nous voulons créer des machines intelligentes, de savoir faire aussi simple et ingénieux.

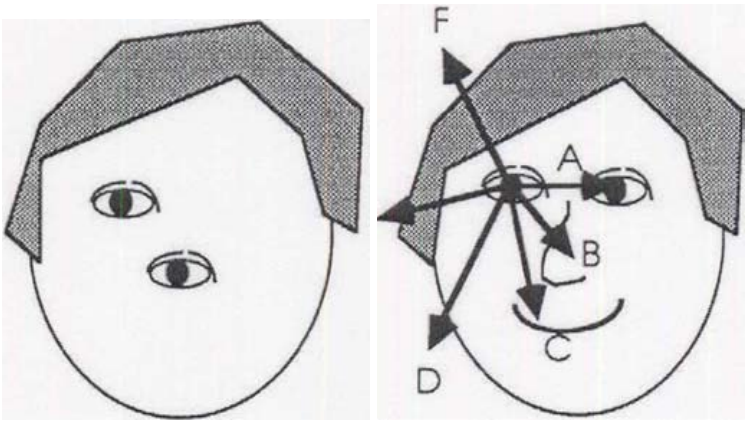


FIG. 5.2 – Reconnaissance des yeux - avec ou sans anomalie de localisation

Chapitre 6

Les reseaux de neuronnes en général

6.1 Généralités

Le modèle de programmation par réseau neuronal est ancien et a beaucoup évolué depuis les année 70. Comme il vous a été montré dans la partie précédente consacrée aux stimuli et à la modélisation informatique d'un neurone biologique, il existe diverses modélisations plus ou moins complexes : les plus complexes permettent de modéliser des systèmes proches de systèmes biologiques (robots d'animaux, robots capables de courir etc...).

Mais il ne faut pas croire que les modélisations plus simples n'ont pas leur utilité : on peut réaliser des fonctions booléennes grâce à des reseaux neuronaux. De plus, le Perceptron, modèle simple et souvent peu multi-couches est encore une des formes de réseaux les plus utilisées.

6.2 Principales sortes de réseaux

Il existe principalement deux sortes de réseaux :

- Le réseau non-bouclé (aussi appelé *feed-forward*) : il s'agit d'un reseau neuronal sans rebouclage, c'est-à-dire sans retour d'information dans les neurones précédemment parcourus. L'information chemine sans retour en arrière et donc en un temps restreint.
- Le réseau bouclé (ou *réentrant*, ou encore concurrent) : celui-ci peut contenir des boucles et retour en arrière. La sortie des neurones peut être rebouclée vers des neurones précédemment parcourus, ainsi le fonctionnement asynchrone de ce réseau, bien que plus lent à cause de la réentrance, permet, à nombre égal de neurones, des capacités énorméments plus vastes.

Ce ne sont pas les seules sortes de réseaux, mais le sujet est très vaste, et donc les autres formes telles que les *réseaux auto-organisés* ne seront pas traitées.

6.3 Quelle est l'utilité du réseau de neurones ?

Il faut bien être d'accord sur le fait que notre but est de réaliser quelque-chose se rapprochant du cerveau humain. Quelle est une des principales capacités du cerveau qui rend l'homme - pour le moment ! ? - supérieur à la machine ?

Bien entendu, il s'agit de la capacité d'apprendre et de s'adapter.

C'est pourquoi les réseaux de neurones sont faits : ils possèdent pour la plupart la possibilité de se modifier afin de mieux répondre aux stimuli de l'environnement. Ainsi, on aura des programmes évolutifs et perfectibles qui pourront s'adapter aux conditions imposée. Les applications sont nombreuses même si les capacités d'apprentissage sont encore restreintes.

Chapitre 7

Les réseaux non bouclés - *feed forward*

7.1 Présentation

Un réseau de neurones non bouclés est un assemblage de neurones organisés en couches : chaque neurone d'une couche peut avoir des connexions à des neurones de la couche inférieure et de la couche supérieure, mais pas aux autre neurones (pas même ceux de la même couche).

La première couche constitue les neurones d'entrée (c'est la couche d'entrée, ou *couche sensorielle*), et la dernière couche est la couche de sortie.

S'il n'y a que la couche d'entrée et celle de sortie, on parle de réseau monocouche, sinon de réseau multicouche, et les couches intermédiaires sont dites *couches cachées*.

7.2 Exemple de réseau non bouclé multicouches

Voici ce qu'on appelle un réseau non bouclé multicouches à trois couches, ou réseau 5-3-2.

Si toutes les connexions possibles sont présentes, alors on parle de connexions completes.

7.3 Application du feedforward : le Perceptron

7.3.1 Présentation : un peu d'histoire...

En 1958, F. Rosenblatt créa le premier reseau de neurones cherchant à comprendre et copier le modèle biologique : le Perceptron.

> La théorie présentée ici traite d'une classe de « modèles cérébraux » appelé perceptron. Par modèle cérébral, nous entendons tout système théorique qui tente d'expliquer le fonctionnement psychologique du cerveau en termes de lois physiques et mathématiques connues et de faits connus en neuroanatomie et physiologie. Les perceptrons sont

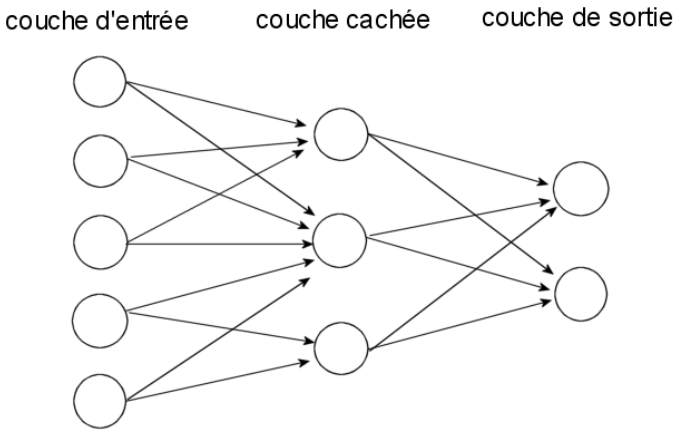


FIG. 7.1 – Exemple de réseau non-bouclé

intéressants en ce que leur étude éclaire la biophysique des systèmes cognitifs[1].

7.3.2 Composition du perceptron

Dans les modèles de base, le Perceptron est formé des éléments suivants :
- Des *unités sensitives* sensibles à des stimulation de l'environnement. En général, si le stimuli dépasse un certain seuil θ , le signal +1 est renvoyé, sinon on retourne le signal 0 ;
- Des *unités d'association* disposant de connexions en entrée et en sortie. Les entrées sont pondérées, et si la somme des entrée pondérées dépasse le seuil θ , alors le signal +1 est retourné ;
- Des *unités de réponse* qui agissent comme les unités d'association mais qui sont en bout de chaine du perceptron ;
- Et enfin une *matrice d'intéraction* qui définit les *coefficients de couplage* (aussi appelés poids de pondération).

7.3.3 Explications

Le modèle de type perceptron est très proche du modèle de Mc Culloch-Pitts[2]. La différence réside dans l'apparition de *coefficients de couplage* aussi appelés poids synaptiques, permettant de pondérer l'entrée.

7.3.4 Apprentissage du perceptron

Le perceptron fonctionne grâce à un système de contrôle de renforcement supervisé. Grâce aux données fournies par l'environnement et aux sorties observées, le système de renforcement modifie les poids synaptiques des unités d'associations afin de produire les sorties attendues. On a ainsi un système

[1] ROSENBLATT, F. - 1962
[2] Ce modèle utilise en entrée des connexions activatrices et inhibitrices

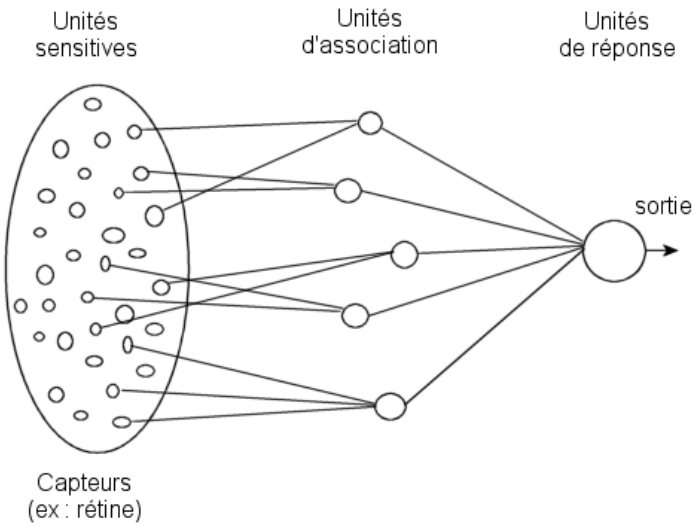


FIG. 7.2 – Fonctionnement du perceptron

d'apprentissage. L'apprentissage est différent en fonction de la fonction d'apprentissage utilisée dans le système de renforcement, et les effets peuvent en être complètement différents. L'apprentissage est détaillé un peu plus loin.

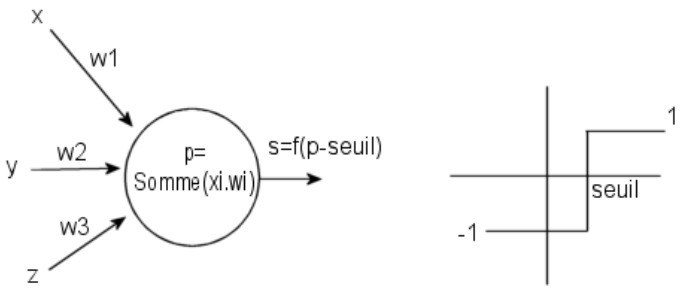


FIG. 7.3 – Fonctionnement d'un neurone du perceptron

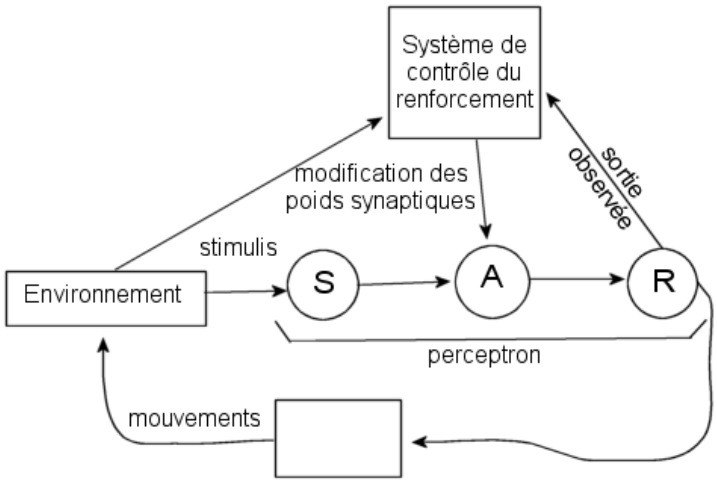


FIG. 7.4 – Apprentissage du perceptron

Chapitre 8

Les réseaux bouclés / réentrants

Les réseaux bouclés sont quasiment identiques aux réseaux non-bouclés à ceci près que les différents neurones peuvent s'interconnecter comme ils le souhaitent, sans aucune restriction de couche. Le fait qu'il puisse ainsi se former des cycles entre les différents neurones permet de stocker de l'information au coeur du réseau et ainsi obtenir une mémoire vive. Le fonctionnement et l'étude de tels réseaux en devient forcement plus complexe c'est pourquoi nous ne traiterons pas cette partie des réseaux de neurones.

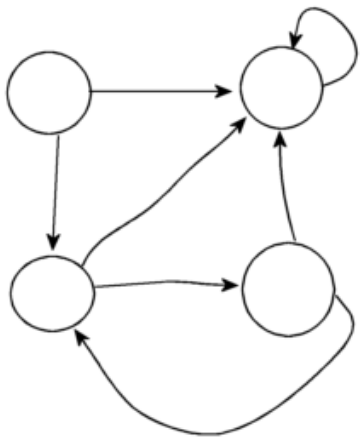


FIG. 8.1 – Exemple de réseau réentrant

Chapitre 9

Etude d'un cas simple : le réseau neuronal de Mc Culloch-Pitts

9.1 Présentation

Nous avons vu dans la partie sur les stimuli que le neurone peut être modélisé de plusieurs manières selon les besoins. Nous allons ici voir les neurones de Mc Culloch-Pitts.

Il s'agit d'un modèle à connexion activatrice / inhibitrice.

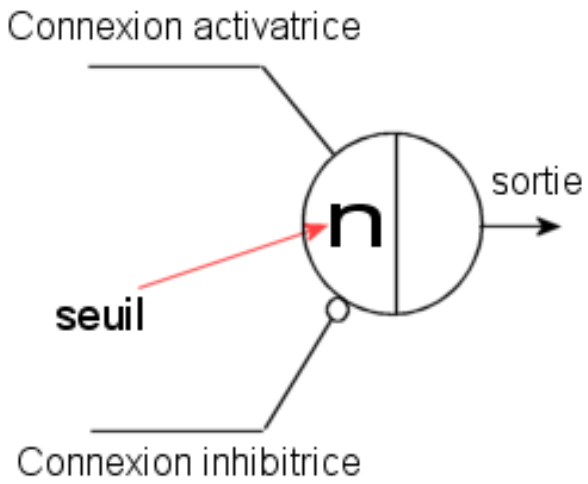


FIG. 9.1 – Modèle de neurone de McCulloch-Pitts

- Une *connexion activatrice* fournit un signal au neurone : ce signal sera ajouté au total des signaux (initialement nul). Le signal peut avoir des valeurs positives ou nulles.
- Une *connexion inhibitrice* fournit aussi un signal, mais celui-ci sera retranché du total des signaux (pouvant devenir négatif de ce fait).
- Enfin, le neurone possède un seuil : en dessous de celui-ci, aucun signal n'est transmis, la sortie vaut 0. Au dessus du seuil, la sortie est activée.

9.2 Fonctions booléennes simples

Ce modèle neuronal simple permet de rapidement recréer toutes les fonctions booléennes de base :

9.2.1 Fonction OU

La fonction OU (**a OU b**) est une des plus simples à réaliser.

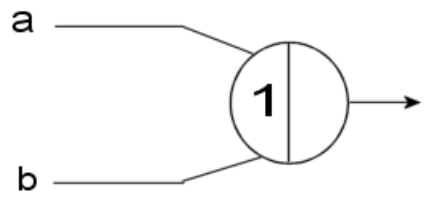


FIG. 9.2 – Implémentation de la porte OU

Si l'une des deux entrées vaut autre chose que 0 (les signaux sont des entiers), le seuil est dépassé, et la valeur 1 est retournée.

9.2.2 Fonction de filtre

Certains neurones ont besoin de valeurs spécifiques en entrée : par exemple la fonction ET qui a besoin d'avoir soit 0, soit 1. Pour cela, on peut facilement créer un filtre : il suffit de prendre un neurone avec une seule connexion activatrice et de fixer le seuil désiré.

Voici un exemple de filtre 0-x vers 0-1 :

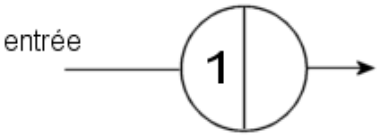


FIG. 9.3 – Fonctionnement d'un fitre

9.2.3 Fonction ET

La fonction ET est un peu plus complexe : il faut que les deux valeurs en entrée soit 1 ou 0. Pour cela on utilise les filtres vus au dessus pour forcer l'entrée à 0-1.

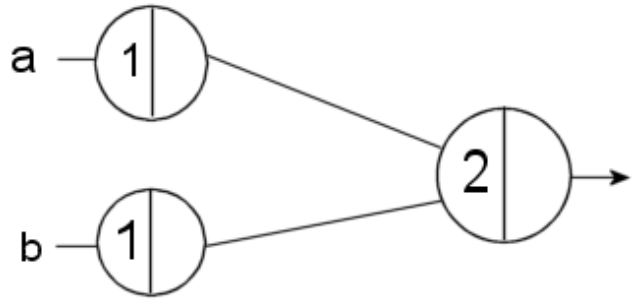


FIG. 9.4 – Fonctionnement de la porte ET

9.2.4 Fonction NOT

La fonction de négation NOT est, elle aussi, assez simple : le seuil est fixé à 0, et on n'a qu'une entrée inhibitrice.

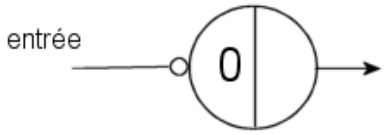


FIG. 9.5 – Fonctionnement de la porte NOT

9.3 Application à un exemple

9.3.1 Présentation du problème

On veut réaliser avec un réseau de neurones un additionneur 1 bit. On a donc besoin :

- De deux entrées a et b que l'on va additionner,
- D'une sortie pour le résultat a+b sur un bit,
- D'une sortie pour la retenue.

9.3.2 Table de vérité

Voici la table de vérité de l'additionneur :

a	b	Somme	Retenue
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1

9.3.3 Résultat avec un réseau non-bouclé

Nous allons donc réaliser un réseau de neurones non-bouclé qui va réaliser les deux sorties à partir des deux entrées.

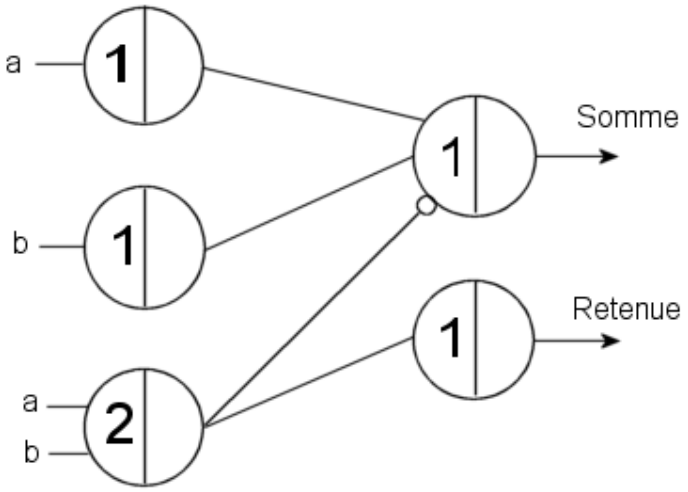


FIG. 9.6 – Additionneur non bouclé

On remarque que de nombreux neurones sont utilisés alors que l'on aurait pu réaliser la même chose avec beaucoup moins de neurones : mais ceci est impossible sans réaliser de boucle.

9.3.4 Résultat avec un réseau bouclé

Pour simplifier le réseau de neurones on peut réaliser du bouclage entre neuronnes. voici le résultat produit pour la même table de vérité :

On a économisé deux neurones au détriment de la simplicité du montage...

9.4 Conclusion

Cet exemple n'est pas représentatif clairement de ce qu'est un réseau de neurones utilisé réellement : les tables de vérité sont gigantesques et les schemas tiennent sur plusieurs pages.

Néanmoins, cela vous aura permis de réaliser qu'à partir de composants simples tel que les neurones de Mc Culloch-Pitts, on a pu réaliser des fonctions complexes. La notion d'apprentissage n'est par contre pas envisageable avec cette représentation.

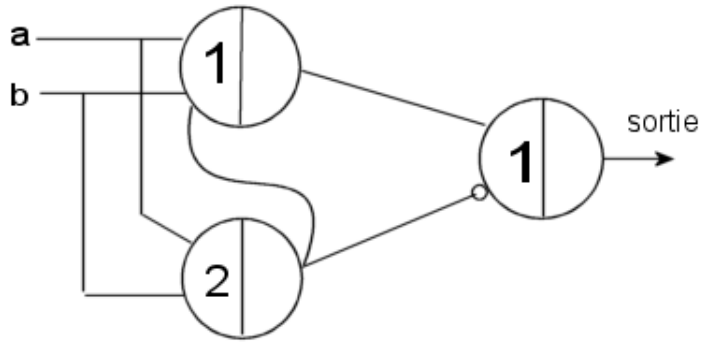


FIG. 9.7 – Additionneur réentrant

Chapitre 10

Apprentissage des réseaux de neurones

10.1 Au départ de l'apprentissage

L'apprentissage est défini comme l'amélioration des performances avec l'expérience. C'est la clé de voûte de toutes les théories avancées d'intéligence artificielle. L'Homme est, quant à lui, préprogrammé pour apprendre dès la naissance. Nous sommes toujours à l'écoute de nouvelles choses à voir, entendre, mémoriser et comprendre. Aucun ordinateur actuel n'est pas capable d'un tel apprentissage généraliste.

10.2 les différents niveaux d'apprentissage

L'apprentissage peut être classé en cinq niveau graduels :

- Le premier niveau d'apprentissage est l'*apprentissage programmé* : ce sont les instructions classique d'un programme, la procédure à suivre par un robot qui aura reçu un programme etc...
- Le niveau suivant correspond à l'apprentissage *par cœur* : il suffit de mémoriser des reflexes ou actions à entreprendre en fonction de chaque situation qui se présente, un peu comme un conditionnement à la Pavlov.
- Dans le niveau supérieur, seules les informations pertinentes sont mémorisées dans un cas donné.
- Au niveau suivant, à l'aide d'un professeur, on doit être capable d'apprendre en généralisant des exemples.
- Enfin au dernier niveau, la démarche est purement inductive sans l'aide d'un professeur, et sans créer de nouvelles situations.

On peut remarquer qu'il est impossible d'apprendre à partir de rien. Ainsi, nous avons toujours besoin d'une base de connaissances minimales pour pouvoir évoluer. C'est cet ensemble de connaissances qui fait actuellement défaut dans la fabrication d'un système capable d'apprendre.

10.3 Implémentation de l'apprentissage

L'apprentissage dans un réseau de neurones est réalisé par un système annexe qui vérifie les données en sortie du système et les compare aux données attendues : si le résultat est le bon, rien n'est modifié, mais si le résultat diffère, il va falloir adapter le résultat.

Comme nous avons vu au niveau du perceptron, la plupart des systèmes neuronaux incluant un apprentissage utilisent la forme de neurone à coefficients de couplage. Ainsi en fonction des données à modifier, il suffira de modifier la pondération de certaines entrée de neurones pour que le résultat soit différent.

Dans un réseau réentrant, on peut introduire des réseaux qui s'auto-modifient en fonction de leurs entrées : on arrive à gérer les états inattendus du système tel que les évènements « traumatisants ».

Chapitre 11

Système expert et Système mutli-agents

11.1 Système expert

Le principe de système expert est basé sur la logique adaptative. La base de l'idée est que le système doit savoir faire des choix comme le ferait un expert dans un domaine particulier. Un logiciel de diagnostique médical prend en entrée des symptômes et, grâce à ses règles de logique, va 'supposer' telle ou telle maladie. Il va, ensuite, proposer une thérapie grâce à sa base de données liée aux maladies. Un exemple célèbre : MYCIN, couçu vers 1972 pour aider aux dignostics et aux soins de maladies sanguines infectieuses.

La décision - les choix - s'aide des systèmes de base de données - on pourrait parler d'expérience - mais aussi sur des méthode de décisions - raisonnements ! ? - comme le moteur d'inférence en ProLog. Le but premier d'un système expert reste un système d'aide à la décision. Il se doit d'être interactif. Tout comme un expert qui a un doute, il doit demander se qu'il doit faire et, peut-être retenir - apprendre - ce qu'il doit faire dans ce cas. Pour cela, un choix des plus logique : demander à l'utilisateur. MYCIN était séduisant car une interface en langage quasi-naturel permettait une communication confortable (et un peu bluffante) avec les utilisateurs.

Dans la majorité de nos cours, nous avons conçu des embryons de systèmes experts sans même le savoir. La gestion prévue d'erreur et ce qu'il faut en faire en sont les premiers pas. Lorsqu'il faut redéfinir un Scheme au-dessus du Scheme ou un Prolog au-dessus du Prolog, là aussi... Le système expert peut être un moyen d'apprentissage pour un système, à l'instar d'un enfant qui questionne ses parents.

11.2 Système Multi-agents

11.2.1 Définitions

Les premières générations de programmes informatiques étaient conçues pour réaliser des tâches habituellement humaines et donc souvent accompagnées d'une identification des machines aux hommes ou agents chargés d'accomplir ces tâches. Mais cette façon de concevoir des agents particuliers, spécialisés dans une tâche à trouver une limite lorsque l'on a cherché à concevoir des applications plus complexes necessitant, non pas un seul agent humain, mais un groupe de personnes.

On définit ainsi un système multi-agent.

Un système multi-agent, ou SMA, est un système dans lequel des agents physiques ou artificiels opèrent collectivement pour accomplir une tâche. Chaque agent est une entité physique ou virtuelle dotée d'objectifs, de comportements, de ressources propres et eventuellement d'une représentation du son environnement.

On distingue plusieurs types d'agents, selon leurs capacités à communiquer avec d'autres agents, agir dans un environnement, percevoir son environnement et s'adapter à ses modifications, se reproduire, posséder des compétences et offrir des services.

11.2.2 exemples de puissance et application

L'exemple courant de la colonie de fourmis illustre bien ce type de systèmes. Chaque fourmi a un comportement très simple, elle est capable de se déplacer à la recherche de nouriture et d'indiquer dans l'environement (par des phéromones) le chemin qu'elle suit. Les fourmis environnantes croisant le message de phéromones indiquant la présence de nouriture vont pouvoir retrouver la nouriture pour l'acheminer à la fourmilière. Ce faisant, elles rajoutent aux phéromones déja présentes intensifiant ainsi l'attrait pour les autres fourmis à suivre leur chemin. Ainsi, elles sont capables de trouver rapidement la nouriture et de l'acheminer. Les phéromones des fourmis s'évaporent, ainsi, le chemin contenant la plus forte teneur en phéromones est choisi par les fourmis. Et il s'en suit que le chemin le plus court est parcouru.

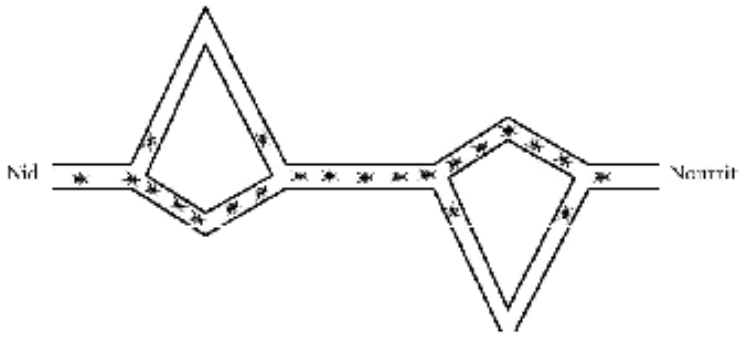


FIG. 11.1 – Détour d'obstacles grâce aux phéromones

Quatrième partie

Conclusion

Chapitre 12

Applications

La modélisation informatique du cerveau humain, ou plus globalement l'intelligence artificielle, a de nos jours de nombreuses applications, nous allons vous présenter ici quelques-unes de ces applications.

12.1 Application militaire

Les applications militaires rentrent au premier plan de la recherche scientifique en intelligence artificielle : les enjeux sont énormes. Pourrait-on lancer des avions au dessus d'une zone ennemie sans aucun pilote à bord, sans pour autant qu'on ait besoin de téléguider l'appareil ? La réponse n'est plus aussi négative qu'il y a vingt ans : des chercheurs de l'Université de Floride ont réussi à cultiver des cellules nerveuses de rat en boite de Petri, puis les ont branchés au simulateur de vol d'un avion *F-22 Raptor*. Le mini-cerveau, composé de seulement 25000 neurones, relié à 60 électrodes, s'est petit-à petit adapté aux stimuli du simulteur pour finalement, au bout de quelques mois d'apprentissage, parvenir à maitenir l'appareil en vol stationnaire.

Les drones[1] sont une des principales recherches actuelles. S'il est relativement facile d'installer un système de pilotage automatique dans un Jumbo-Jet de grande taille, l'adaptation sur de petit modèles pesant parfois moins de 100 grammes pose actuellement de nombreux problèmes. En effet, une simple brise pour un avion de ligne correspond, pour un si petit objet en vol, à une tempête ! Installer à bord une intelligence capable de palier aux changements soudains et capable de s'adapter aurait de nombreux avantages dans le cadre de l'espionnage, ou même dans des cadres non-militaires comme par exemple la surveillance d'un terrain de sport lors d'une retransmission télévisée.

12.2 Jeux Vidéos

Les jeux vidéos sont aussi un domaine d'application de l'intelligence artificielle, mais les investissements sont moindre par rapport à ceux de l'armée. La plupart du temps, cela se résume à essayer de réaliser des créatures virtuelles

[1] appareil léger sensé voler sans pilote

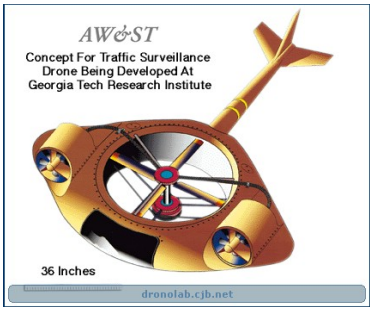


FIG. 12.1 – Les chercheurs fabriquent des Drones

dotées d'une pseudo-intelligence, tel que les *Nurns* du jeu *Créatures*, sorte de petits monstres évoluant selon votre apprentissage. De nos jours, il est très fréquent que les jeux soit dotés d'une intelligence artificielle, mais la plupart du temps cela se résume à des algorithmes de calcul de meilleur coup, de prévision d'actions et de paroles préconçues, etc.

Une vraie intelligence artificielle (dans le sens réseau de neurones, évolution, etc.) demande trop de ressources pour les ordinateurs actuels (surtout lorsqu'un grande partie de celles-ci sont utilisées pour les graphismes 3D) ou une révision des structures.

12.3 Robotique

12.3.1 En quête d'intelligence

Les premiers robots intelligents connus du monde entier sont bien sûr les robots R2D2 et C3PO[2], ainsi que Frankenstein. Depuis ces robots avant-gardistes bien que fictifs, il est de plus en plus courant dans notre culture de se représenter les robots sous forme humanoïde.

Seulement, même si à l'heure actuelle nous arrivons à créer des machines à forme humaine, cela ne reste que de vulgaires automates sur pattes, capables de marcher ou répondre à des questions prédéfinies ou encore obéir à des ordres. La notion d'intelligence étant difficile à évaluer, il est et il restera difficile de dire si une machine est « intelligente ».

Les chercheurs tentent aussi de copier des animaux commme les poissons, les chiens[3] et bien d'autres. On cherche aussi à reproduire des formes de vie plus simples comme les fourmis ou plus complexes[4], ou même les cellules vivantes[5].

12.3.2 Le Mouvement

Le mouvement rectiligne à l'aide de roues ou de chenilles est assez simple à programmer. Lorsqu'on s'attaque aux mouvement quadripèdes ou, pire, bipèdes, la complexité est différente et augmente.

[2] Heros de *La Guerre des Etoiles*
[3] Comme le célèbre Aibo
[4] C'est le principe du biomimétisme
[5] C'est le principe de la nanotechnologie

Dans le cas de la bipèdie, les facteurs à prendre en compte sont nombreux : l'équilibre, le vent, l'inclinaison du sol, les sauts et la course.

Nous y arrivons très bien, mais il n'en est pas de même des robots actuels : nous sommes passé par une phase d'apprentissage ou notre agilité s'est fortement developée, et seule l'intelligence artificielle pourrait rendre cet apprentissage possible aux machines. Cependant la complexité est, encore une fois, bien trop élevée pour prendre en compte les différents facteurs pouvant influencer le mouvement, c'est pourquoi la plupart des robots n'utilise pas la bipèdie et est utilisée pour des tâches spécifiques.

12.3.3 Perception

La perception est peut-être une des applications les plus developées, car son utilité touche beaucoup de domaines. Dans le cadre de la robotique, il s'agit de percevoir les autres et l'environnement. On peut aussi utiliser des sytèmes neuronaux pour reconnaitre des formes dans le traitement d'images, ou encore dans la perception des distances et de l'espace.

Ainsi, une expérience[6] affectuée sur deux aveugles (un de naissance, l'autre par accident) a montré que ce sont les stimuli qui sont la base des sens.

De toute façon, il s'agit du principe de base de l'intelligence artificielle : apprendre à réagir à des stimuli de l'environnement.

12.3.4 Esprit d'équipe

La nature nous montre que des esprits, aussi simples qu'ils soient, une fois mis en commun en grand nombre, permettent de réaliser de grande choses. L'esprit de groupe se retrouve chez les fourmis, ou encore les abeilles, qui sont capables de vivre en groupe avec chaque individu ayant une tâche bien définie, etc.

L'application informatique est bien-sûr le système multi-agents exposé précèdemment.

[6] Une caméra fixée sur la tête transmet des impulsions électriques à la langue. Après un moment d'adaptation, les cobayes « voyaient ».

Chapitre 13

Un futur par si lointain...

Les applications récentes de l'intelligence artificielle sont étonnantes. Elles nous font entrevoir un futur qui appartennait, il y a quelques années, au domaine de la science fiction.

Les machines dites intelligentes tendent à devenir de plus en plus autonomes, voire, d'ici quelques décénies, conscientes. Il est aisé alors d'imaginer des robots peuplant nos rues, affairés à nous rendre la vie plus simple et agréable, des machines nous apportant distraction et aide au travail, soin et conseil.

Malheureusement, des visions plus noires de cette évolution peuvent aussi apparaître. L'utilisation dans le domaine militaire, par exemple. Le soldat robot ne fait plus risquer sa vie à l'humain. Par contre, il prend ses décisions sans aucune émotion, aucun sentiment, aucun doute, laissant place à l'implacable logique de sa formation, ses ordres, sa mission.

Nous n'en sommes pas encore là - même si cela ne va guère tarder. Les connaissances en biologie du cerveau ne sont pas encore suffisamment avancées pour pouvoir imaginer reproduire son fonctionnement réel. Toutefois, les progrès parallèles de la biologie et de l'informatique tendent à nous faire imaginer des systèmes de plus en plus complexes et proches de la réalité. Reste à se demander le moment où le modèle sera suffisamment proche pour un début de "Conscience"...

Cinquième partie

Références

13.1 Bibliographie

- A. THAYSE,*Approche logique de l'intelligence artificielle*
- J-L LAURIERE,*Intelligence artificielle, Résolution de problèmes par l'homme et la machine*
- Guy BOY,*Assistance à l'opérateur, Une approche de l'intelligence artificielle*
- Jeff HAWKINS & Sandra BLAKESLEE,*Intelligence*
- Ruth AYLETT,*Robots, Des machines intelligentes et vivantes ?*
- Phillipe Collard,*Cours de Prolog*

13.2 Les sources web

- http ://www.wikipedia.org/
- http ://www.lecerveau.mcgill.ca/
- http ://memoireonline.free.fr/agents.htm
- http ://www.univ-montp3.fr/miap/ jq/IntCollective6.pdf
- http ://www.generation-nt.com/actualites/10653/simulateur-vol-f22-rat-neurones

Table des figures

1.1 Structure de l'oeil 9
1.2 Vision à l'aide d'une rétine artificielle 10
1.3 Fréquence de vibation de la cochlée 10
1.4 Emission de son - Spectre de modulation d'amplitude 11
1.5 Sonogramme (de fréquences) - Numérisation 11
1.6 Divers écrans tactiles 12

2.1 Voici un neurone sensoriel 14
2.2 Ceci est un neurone moteur, responsable de l'envoie d'information au reste du corps 14
2.3 Et enfin l'interneurone, responsable de la transmission d'informations 14
2.4 Photographie de neurones 15

3.1 Les grandes zones du cerveau humain 18

5.1 Transmissions du l'information - informative et motrice 25
5.2 Reconnaissance des yeux - avec ou sans anomalie de localisation . 28

7.1 Exemple de réseau non-bouclé 32
7.2 Fonctionnement du perceptron 33
7.3 Fonctionnement d'un neurone du perceptron 34
7.4 Apprentissage du perceptron 34

8.1 Exemple de réseau réentrant 35

9.1 Modèle de neurone de McCulloch-Pitts 37
9.2 Implémentation de la porte OU 38
9.3 Fonctionnement d'un fitre 38
9.4 Fonctionnement de la porte ET 39
9.5 Fonctionnement de la porte NOT 39
9.6 Additionneur non bouclé 40
9.7 Additionneur réentrant 41

11.1 Détour d'obstacles grâce aux phéromones 46

12.1 Les chercheurs fabriquent des Drones 50