

## Les Neurosciences cognitives

par François CLARAC

Directeur de recherche émérite du CNRS, conférencier invité

---

### MOTS-CLÉS

Connexionnisme - Processus mentaux - Réseaux de neurones - Sciences cognitives - Traitements symboliques.

### RÉSUMÉ

Les sciences cognitives désignent les processus mentaux se rapportant à la connaissance. L'esprit humain nous permet de construire une représentation opératoire de la réalité.

Ces sciences se structurent suivant deux courants principaux, le cognitivisme fondé sur l'idée d'un traitement de l'information et le connexionnisme basé sur la notion de réseaux de neurones capables de construire des entités symboliques.

Parmi les projets prévus à l'avenir l'un des plus spectaculaires sera celui qui prévoit la réalisation d'un cerveau virtuel de mammifère vers 2018.

---

Les Sciences cognitives désignent l'ensemble des processus mentaux impliqués dans la perception l'attention, la reconnaissance, la mémoire, la réflexion, le raisonnement, l'apprentissage, l'intelligence, la prise de décision, le langage... Transdisciplinaires, ces disciplines recouvrent les domaines scientifiques suivant : les neurosciences, la psychologie, l'intelligence artificielle, les mathématiques appliquées à la modélisation des fonctions mentales, l'anthropologie ou la philosophie de l'esprit. Le mot "cognition vient du latin "*cognitio*" ("action de connaître") dérivé du verbe *cognoscere* ("prendre connaissance"). Comme la cognition a pour origine les structures cérébrales les plus complexes, il est nécessaire de connaître l'organisation du système nerveux ainsi que la mosaïque cérébrale qui le compose, avant d'en aborder son fonctionnement et ses mécanismes.

## I – Du cerveau aux cellules nerveuses

### I.1 – Organisation du cerveau

Le cerveau n'a véritablement été décrit scientifiquement qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle. C'est le médecin Jules G.F.Baillarger (1806-1891) qui, par une étude sur coupes minces du cortex observées à la loupe, a démontré la présence de six couches alternativement grises et blanches. Paul Broca (1824-1880) sera le premier qui scientifiquement décrira une aire du cerveau en présentant le 18 avril 1861 une communication sur le "cas Leborgne". Monsieur Leborgne, un homme de 55 ans, était arrivé le 11 avril 1861 dans son service ; il l'a examiné le lendemain, les autres patients l'appelaient "Tan" car c'est, avec quelques obscénités, la seule chose qu'il

pouvait dire. Dans sa jeunesse, il avait eu des crises d'épilepsie et n'avait plus parlé dès 1840. Depuis dix ans, il était incapable d'utiliser son bras droit, tout en marchant sans difficulté. La paralysie avait pourtant gagné le membre inférieur droit. Alité depuis sept ans, il se servait de ses membres gauches, la langue restait parfaitement libre et son intelligence paraissait normale. Broca le voit plusieurs jours de suite et suggère une lésion cérébrale progressive gauche. Le célèbre neurologue, Simon Aubertin (1825-1865) l'examine aussi, et confirme son diagnostic. Le malade meurt le 17 avril à onze heures du matin. L'autopsie est pratiquée dès le lendemain matin et l'après-midi même, Broca donne une communication à la Société d'Anthropologie en présentant le cerveau conservé dans l'alcool. Cette "preuve anatomique" sera envoyée au musée Guillaume Dupuytren (1777-1835) où on peut toujours l'admirer. Dans un exposé beaucoup plus détaillé au mois d'août, il redécrit le même cas en s'étendant beaucoup plus sur la localisation du langage. Il est évident que "Tan" devient un cas d'école. Broca, bien qu'il ne soit pas le premier à aborder un tel sujet, parle d'une aire précise et délimitée, le pied de la deuxième et troisième circonvolution frontale gauche. La même année, il propose le cas d'un autre patient aphasique de quatre-vingt-quatre ans nommé Lelong. Disant seulement quelques mots comme "oui, non, un, deux, trois... toujours...", n'écrivant plus, mais capable de faire quelques gestes, ce cas confirme qu'une perte partielle du langage n'est liée ni à un déficit physique, ni à un déficit intellectuel. Quand Lelong meurt, Broca trouve une lésion au même endroit de l'hémisphère gauche. Broca, assuré d'avoir confirmé sa première investigation juge qu'il avait localisé le centre du langage.

Une polémique pourtant va apparaître avec un médecin de la région de Montpellier Gustave Dax (1815-1893), qui avait déposé, le 24 mars 1863, un manuscrit à l'Académie de médecine, un peu avant les résultats de Broca. Il faisait part des données de son père, Marc Dax (1770-1837), un médecin de Sommières qui avait décrit de nombreux cas de lésions de l'hémisphère gauche, associées à une paralysie droite du corps et à une aphasie. Dès 1836, le père proposait l'observation de quarante patients, somme de vingt ans de travaux. Le manuscrit de Gustave Dax avait été confié à une commission composée des médecins Jean-Baptiste Bouillaud (1796-1881), Jules Béclard (1817-1887) et Louis Francisque Lelut (1804-1877). Ils laissèrent la communication de côté. Gustave Dax ne réussit à publier le manuscrit de son père, qu'en 1865 dans la Gazette Hebdomadaire de Médecine et de Chirurgie. La publication n'a été retrouvée que dans les années 1880, dans les papiers du doyen de la faculté. En étudiant la revue en détail, aucune mention n'est faite sur 1836. Cette querelle aurait pu jeter une ombre sur l'antériorité de la découverte de Broca qui s'en est d'ailleurs toujours défendu avec véhémence.

En 1909 grâce à une étude histologique comparée aux résultats cliniques, Korbinian Brodmann (1868-1918) a défini 47 aires de l'écorce cérébrale. Ainsi chaque zone est partout composée de six couches mais suivant leurs implications fonctionnelles, qu'elles soient sensorielles, motrices ou d'association, les cellules nerveuses ne sont pas dans les mêmes couches et leur nombre peut énormément varier (Clarac et Ternaux 2008).

## **I.2 – Les cellules nerveuses ou neurones**

La connaissance se fait successivement par une suite d'observations rigoureuses : J. Purkinje (1787-1869) décrit les cellules du cervelet. R.A. von Kölliker (1817-1905) démontre la liaison entre substance blanche et substance grise. Dans les

corps cellulaires O. F.K. Dieters (1834-1863) distingue un plus long prolongement: le cylindraxe. De l'Université de Bonn, ce neuroanatomiste du cerveau et de la moelle épinière a identifié "*la cellule axonémale*", qu'il nomme alors "*axis cylinder*" ou axone, et ses dendrites, qu'il classe parmi les cellules protoplasmiques. Il postule que les dendrites doivent fusionner pour constituer un réseau continu. De telles descriptions vont être à l'origine d'une théorie dite "réticulariste". Due à J. von Gerlach (1816-1896), elle développe l'idée que s'il y a bien des cellules nerveuses avec un noyau et des prolongements, les neurones sont reliés entre eux permettant ainsi une conduction immédiate comme il apparaît des réponses nerveuses. On ne pouvait croire à une conduction rapide si les neurones restaient séparés et non pas fusionnés. Deiters meurt en 1863 de fièvre typhoïde. Ses travaux concernant les cellules de la moelle épinière furent édités et publiés par l'anatomiste allemand Max Schultze (1825-1874).

La méthode de Golgi, coloration spécifique des structures nerveuses va révolutionner une telle étude. Cette technique mise au point par un médecin Italien, Camillo Golgi (1843-1926) et nommée "la réaction noire", nécessite l'utilisation de sels d'argent que l'on dépose sur des coupes histologiques imprégnées auparavant de bichromate de potassium. Le paradoxe de cette technique est que la coloration noire des neurones par les sels d'argent "marche mal". En effet seulement certains neurones prennent la coloration alors que la plupart ne répondent pas à l'argent. Mais ceux qui sont colorés le sont jusqu'à leurs plus fines extrémités. Ainsi dans une coupe de tissu nerveux seuls quelques éléments sont très visibles alors que d'autres restent incolores.

La théorie "Neuroniste" est présentée pour la première fois par Heinrich Wilhelm Gottfried Waldeyer-Hartz (1836-1921) en 1891. Pourtant la connaissance définitive des neurones viendra de l'Espagnol Santiago Ramon y Cajal (1852-1934). Dès 1887, il maîtrise la coloration de Golgi, tout en apportant des améliorations méthodologiques significatives: il augmente la concentration de bichromate de potassium, allonge de 1 à 6 jours, le temps d'imprégnation dans le nitrate d'argent, et utilise en général, de petits et de jeunes mammifères, lorsque la myéline n'occupe pas encore toute la préparation. Moins développée l'organisation est donc moins compliquée, la myéline est moins dense, le colorant pénètre mieux. Cajal dispose d'échantillons de bien meilleure qualité que les autres histologistes. Il observe ses coupes avec un microscope doté d'un objectif "Zeiss". Cet objectif de grande ouverture, extrêmement moderne pour l'époque lui avait été offert par le gouvernement de Zaragoza lorsqu'il avait soigné avec succès le choléra dans cette ville. Il réalise des préparations épaisses pour avoir une plus grande profondeur de champ, pour suivre sur une plus grande distance, les différents prolongements d'une même cellule. En général il observe et étudie très longtemps ses coupes, les regarde à différentes profondeurs pour bien repérer les multiples contacts et embranchements. Ensuite, sans plus s'intéresser à elle, il dessine l'ensemble. C'est un artiste dont la précision scientifique provoque l'admiration de tous ! En 1890, Cajal démontre comment les axones se développent à partir des cônes de croissance. Cette approche tirée de l'embryologie conforte la théorie neuronique. Ses travaux sont d'abord publiés en espagnol en 1899 et en 1904 ("*textura del sistema nervioso del hombre y de los Vertebrados*") puis en français en 1909 et en 1911 grâce à une excellente traduction du docteur Azoulay, "*Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés*".

En 1906, le prix Nobel de Médecine est décerné à Golgi et à Ramon y Cajal qui ne s'aimaient guère. Durant toutes les séances à Stockholm, ils s'évitèrent et ne s'adressèrent jamais la parole. On dit que le plus rancunier fût Golgi qui considérait que Cajal lui avait volé sa découverte. Il était peut-être jaloux de la beauté de coupes histologiques de son adversaire qui en plus en parlait avec le plus d'enthousiasme !

Les cellules nerveuses sont en contiguïté et non pas en continuité. Avec les préparations histologiques, il était impossible de le prouver, les microscopes n'étaient pas assez puissants pour distinguer et dissocier les membranes. La synapse (du grec *syn* = ensemble et *haptein* = toucher, saisir) sera pourtant définie dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et sera proposée par Sherrington. A cette époque, on savait seulement qu'il y avait une séparation entre deux neurones

La preuve définitive de cette séparation et donc de la véracité de la théorie du Neurone ne sera apportée que soixante ans plus tard par le microscope électronique et les travaux de Chan Palay (1918-2002) en 1955. La fente synaptique, qui mesure environ 20 nm de large est remplie de matériel dense parallèle aux membranes. D'habitude, le lieu initial de la dépolarisation est la membrane postsynaptique. L'influx nerveux se propage ensuite le long de la membrane de la dendrite puis de l'ensemble autour du noyau en s'atténuant peu à peu. Si au niveau du cône d'émergence, le potentiel est suffisant (loi du *tout ou rien*), des potentiels d'action sont générés qui se propageront le long de l'axone sans déperdition d'activité. En arrivant à la membrane du bouton terminal, ils déclencheront la libération des microvésicules contenant les neurotransmetteurs, qui diffuseront dans la fente synaptique avant d'être captés par les récepteurs de la membrane suivante, postsynaptique.

### I.3 – Le fonctionnement cérébral, des réflexes aux neurotransmetteurs

Une première hypothèse de fonctionnement général du système nerveux sera apportée par le physiologiste anglais, Charles Sherrington (1857-1952), professeur de physiologie à Liverpool puis à Oxford. Dans son livre de 1906, "*the integrative action of the nervous system*" (l'action intégrative du système nerveux), il définit la coordination motrice générale comme organisée au niveau du système nerveux par un ensemble de réflexes. Il a travaillé essentiellement chez le chat en caractérisant au niveau de chaque segment de la moelle épinière des réflexes courts avec une entrée sensorielle et une sortie motrice et des réflexes longs impliquant plusieurs segments spinaux. Il considérait ainsi que l'organisme était sans cesse sous le contrôle de l'environnement mais qu'il était capable grâce à ses différents éléments nerveux de s'adapter le mieux possible.

A peu près au même moment, un compatriote, professeur à l'université de Cardiff, Thomas Graham Brown (1882-1965) propose une hypothèse opposée en démontrant chez un chat où toutes les terminaisons sensorielles périphériques ont été coupées que les mouvements locomoteurs des membres postérieurs persistent. Le rythme n'a donc pour origine que les réseaux nerveux de la moelle épinière elle-même. Cette hypothèse sera largement confirmée dans les années 1960 lorsque l'on décrira dans des ganglions d'invertébrés isolés la présence de programmes de marche chez des crustacés ou des programmes de vols chez les criquets. On parlera de programmes générateurs centraux (en anglais, *Central Pattern Generators*, CPGs).

La physiologie nerveuse va encore progresser grâce à un autre modèle d'invertébré, l'axone géant de calmar. En séjournant à Woods Hole en 1936, le zoologiste John Zachary Young (1907-1997) en observant des calmars a noté dans

leur manteau la présence d'un axone géant (plus de 1 mm de diamètre, 0,5 mm en moyenne). Cet axone contrôle le système de propulsion d'un jet d'eau ce qui permet à l'animal de réaliser de brefs mais très rapides mouvements dans l'eau.

Cet axone géant a été étudié aussi bien à Woods'Hole aux Etats-Unis par Cole et Curtiss mais surtout par Alan. L.Hodgkin (1914-1998) et Andrew F. Huxley (1917-2012) qui ont travaillé à Plymouth et à Cambridge. Ils ont été capables tout d'abord d'enregistrer l'activité à l'intérieur de l'axone. Ce n'est seulement qu'après la deuxième guerre mondiale, qu'ils ont pu "clamber" la cellule, c'est-à-dire la maintenir à un potentiel fixe et ainsi étudier les mouvements des ions des sodium (Na<sup>+</sup>) et potassium (K).

Dans les années 1950, le cerveau paraît un ensemble de câblages et de cellules nerveuses connectées...ne dit-on pas qu'il possède... 100 milliards de neurones, chacun étant lié aux autres éléments par près de 10 000 contacts. On imaginait qu'en décryptant toutes les connections et toutes les synapses, on allait expliquer le fonctionnement du cerveau. Le système nerveux ressemble à un ensemble "de circuits électriques", comme un centre téléphonique, on parlera bientôt "d'un Hyper-ordinateur". Le neurone est un élément de communication qui parle suivant un codage en fréquence. Tout est câblé et ce sont ces connections qui assurent le fonctionnement cérébral. Un tel câblage décrit dans les années 1950, fait penser aux ordinateurs qui sont en train d'être élaborés et construits (voir partie suivante).

Pourtant il existe un autre cerveau réglé par les neurotransmetteurs : le cerveau chimique. Par leurs expériences sur le curare, Claude Bernard (1813-1878) et Alfred Vulpian (1826-1887) ont montré que le curare interrompt la communication entre le nerf et la fibre musculaire. Beaucoup croyaient, du fait de la conduction électrique, à des actions synaptiques électriques. Il faudra attendre le début du XX<sup>e</sup> siècle avec Henri H. Dale (1875-1945) et Otto. Loewi (1873-1961) pour que commence véritablement une physiologie des neurotransmetteurs. Grâce à Bengt O.T. Falck (1927-) et Nike-Ake Hillarp (1915-1965), il sera possible en 1960 de faire des marquages neurochimiques fonctionnels (voies cathécholaminergiques). On va ainsi jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle découvrir qu'au niveau de la synapse il existe de très nombreux récepteurs qui s'associent à de très nombreuses substances chimiques.

Y-aurait-il deux cerveaux, un cerveau câblé et un cerveau hormonal ? un premier fait de circuits nerveux au câblage précis, et un second plus proche d'une soupe de molécules aux effets diffus. En fait, on a affaire à deux ensembles complémentaires qui se complètent mutuellement de façon remarquable. Le cortex "rationnel" dialogue ainsi constamment avec le système limbique "émotif" et les structures hypothalamiques "pulsionnelles". C'est de cette façon que l'intégration entre les besoins du corps et les désirs de la pensée se réalise.

## II – Naissance de la cognition

L'origine de cette nouvelle discipline est difficile à définir mais on peut la faire remonter au "*béhaviorisme*" (ou science du comportement) qui débarrasse la psychologie de ses approches trop littéraires.

## II.1 – Une nouvelle façon de penser

En 1913, John Broadus Watson (1878-1958) établit les principes de base du béhaviorisme dans un article intitulé “*La psychologie telle que le béhavioriste la voit*” où il considère la psychologie comme une science naturelle qui doit se limiter aux événements observables et mesurables (fig.1). Pour connaître les fonctions spirituelles, il refuse l’introspection qu’il juge antiscientifique, il ne veut se baser que sur des données expérimentales, des tests qui indirectement permettront de juger l’individu à ses réponses. Il fait de l’apprentissage un objet central pour l’étude du comportement en réponse à des “stimuli” de l’environnement.

L’Anglais Alan Turing (1912-1954), un mathématicien de génie invente une machine, une sorte de modèle abstrait des appareils mécaniques de calcul, tel un ordinateur et sa mémoire, en vue de donner une définition précise au concept d’algorithme ou “procédure mécanique”. Les premiers ordinateurs apparaissent dans les années 1950.

Les Américains, l’un, neurologue Warren Mc Cullock (1898-1969), et l’autre, psychologue Walter Pitts, (1923-1969) ont écrit en 1943 un article qui va révolutionner les connaissances du système nerveux “*A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity*”. Ce travail propose pour la première fois un modèle mathématique d’un réseau nerveux. L’unité de base est un neurone formel. Un neurone formel est une représentation mathématique et informatique d’un neurone biologique. Il possède généralement plusieurs entrées et une sortie qui correspondent aux dendrites et au cône d’émergence du neurone biologique, point de départ de l’axone. Les actions excitatrices et inhibitrices des synapses sont représentées par des coefficients numériques (les poids synaptiques) associés aux entrées. Les valeurs numériques de ces coefficients sont ajustées dans une phase d’apprentissage. Dans sa version la plus simple, un neurone formel calcule la somme pondérée des entrées reçues, puis applique à cette valeur une fonction d’activation, généralement non linéaire. La valeur finale obtenue est la sortie du neurone.

La création d’hyper machines pour le calcul va se concrétiser avec, aux Etats-Unis en 1946, l’ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) grâce à John Pres. Eckert (1919-1995) et à John W. Mauchly (1907-1980). La programmation d’un tel calculateur s’effectue en recâblant entre eux, ses différents éléments. Composé de 19000 tubes, il pèse 30 tonnes, occupe une surface de 72 m<sup>2</sup> et consomme 140 kilowatts. La machine fut utilisée jusqu’en octobre 1955, mais dès ses premières démonstrations publiques elle avait su frapper l’imaginaire des gens, tant par sa taille, que par son impressionnante vitesse de calcul qui annonçait définitivement une révolution dans le domaine des calculateurs. Malgré sa grande réussite, le terme ordinateur ne peut s’appliquer à l’ENIAC, car il n’était en somme qu’une réalisation électronique d’une machine à calculer mécanique universelle.

La métaphore de l’ordinateur prend sa source dans la théorie mathématique de la calculabilité due essentiellement à la démonstration de Turing (1937) où il assimile depuis l’avènement de l’ordinateur matériel, conçu par John von Neumann (1903-1957) en 1945, l’esprit au logiciel et le cerveau au matériel d’un ordinateur. La première machine fonctionnelle à avoir intégré l’enregistrement interne des programmes a été construite en Angleterre à l’université de Manchester et a permis au premier ordinateur au monde de démarrer en 1948. L’avènement de l’ordinateur confirme à beaucoup de scientifiques que pensée et calcul sont équivalents.



Aujourd'hui, on considérerait une telle association comme bien naïve car c'est oublier les potentialités de l'esprit humain avec la conscience, l'intelligence, l'imagination, le libre arbitre, la créativité, les émotions, les sentiments... On se limite à l'époque à quelques règles formelles manipulant des symboles structurés. Ainsi partant d'un neurone biologique, on élabore un neurone formel qui résume et quantifie les propriétés neuroniques en possédant différentes entrées au niveau des dendrites, en stockant les informations (positives ou négatives) dont la somme peut être véhiculée sur toute la cellule nerveuse. Lorsque ces informations atteignent un certain seuil, elles déclenchent des potentiels d'action.

## II.2 – La fondation Macy

“La Josiah Macy, Jr. Fondation” qui était un organisme américain d'aide dans le domaine de la santé et de l'éducation va promouvoir une série de conférences entre 1942 et 1953. Ces conférences Macy, organisées à New York par cette fondation à l'initiative du neurologue Warren McCulloch, réunirent à intervalles réguliers un groupe interdisciplinaire de mathématiciens, logiciens, anthropologues, psychologues et économistes qui s'étaient donnés comme objectif d'édifier une science générale du fonctionnement de l'esprit (fig.2). Elles furent notamment à l'origine du courant cybernétique, des sciences cognitives et des sciences de l'information. On peut distinguer deux groupes principaux parmi les participants aux conférences :

- 1) d'un côté les membres du mouvement “personnalité et culture”, tels Margaret Mead, anthropologue (1901-1978), Lawrence Kubie, Neurologue, (1896-1973), Lawrence Frank ou Frank Fremont-Smith qui souhaitent instaurer une réciprocité entre les sciences mathématiques et physiques et les sciences psychologiques ;
- 2) de l'autre, les “cybernéticiens”, tels Norbert Wiener (1894-1964), Warren McCulloch ou le physiologiste Arturo Rosenblueth, (1900-1970) qui, au contraire, mènent un combat contre les sciences psychologiques établies au nom des sciences mathématiques et physiques.

La phase décisive de la naissance de la psychologie cognitive date de 1956 lors de deux conférences tenues l'une à Cambridge et l'autre à Darmouth. Herbert Simon (1916-2001), Noam Chomsky (1928-), Marvin Minsky (1927-) et John McCarthy (1927-2011), en avancèrent l'idée essentielle : l'intelligence humaine est tellement proche de ce qu'est un ordinateur que la cognition peut être définie par le calcul symbolique (ou computation) de représentations symboliques. C'est la *“recherche de moyens susceptibles de doter les systèmes informatiques de capacités intellectuelles comparables à celles des êtres humains”*. Le terme “intelligence artificielle”, créé par John McCarthy, est souvent abrégé par le sigle “IA” (ou “AI” en anglais, pour *Artificial Intelligence*). Il est défini par l'un de ses créateurs, Marvin Lee Minsky, comme *“la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique”*. On y trouve donc le côté “artificiel” atteint par l'usage des ordinateurs ou de processus électroniques élaborés et le côté “intelligence” associé à son but d'imiter le comportement

Parallèlement, de nombreux chercheurs vont par leurs travaux, démontrer l'importance de la cognition dans bien des domaines. Ainsi Jacques Paillard (1920-1986) considère que toute fonction motrice chez l'homme fait intervenir un

niveau bas sensori-moteur et un niveau haut cognitif. le vieillissement touche également les deux niveaux d'action, à la fois le physique et le psychique...Le passif et l'actif: l'apprentissage ne se fait que de façon active. Dispositif expérimental permettant de soumettre deux chatons élevés depuis leur naissance à l'obscurité totale à une expérience visuelle identique associée chez l'un d'eux à une exploration active de son environnement et chez l'autre à un transport passif. (D'après HELD et HEIN 1963). Libre, le chat passif est incapable de se déplacer normalement et éviter les obstacles alors que le chat actif n'aura aucune difficulté à les éviter.

### II.3 – Les premiers cognitivistes

Jusqu'aux années 1970, le terme "sciences cognitives" n'existait pas. Pourtant peu à peu une convergence d'idées et de recherches s'opérait entre certains chercheurs en IA, psychologues cognitifs, linguistes et philosophes... Il faudra attendre 1975 pour que l'on commence, aux Etats Unis, à parler d'une nouvelle discipline. Les sciences cognitives "débarquent" en France vers 1985. Le CNRS prend conscience de la nouveauté et organise les premiers programmes pluridisciplinaires. De nombreux centres de recherche se rebaptisent "cognitifs". En 1985, le psychologue Howard Gardner (1943-) publie la première Histoire de la révolution cognitive, sous-titrée "Une nouvelle science de l'esprit" (Payot, 1993). Ce psychologue s'était fait remarquer par un livre traduit en Français sous le titre "*Les intelligences multiples : La théorie qui bouleverse nos idées reçues*".

Noam Chomsky (1928-) a fondé la linguistique générative et s'est fait connaître du grand public, par son parcours d'intellectuel engagé de sensibilité anarchiste. Visant à rendre compte des structures innées des "facultés du langage", la théorie de Chomsky est souvent considérée comme la contribution la plus importante dans le domaine : on peut même dire qu'elles ont été à la base de la "révolution linguistique cognitive" qui estime que la création, l'apprentissage et l'usage du langage correspondrait à un modèle unique lié aux processus génétiques. Cependant, les linguistes cognitivistes ont rejeté l'idée que l'esprit humain posséderait un quelconque module unique et autonome dédié à l'apprentissage du langage et s'opposent aux travaux réalisés de Noam Chomsky ; La linguistique cognitive se caractérise par son adhésion à trois postulats de base. D'abord, elle nie qu'il existe une faculté linguistique autonome dans l'esprit ; ensuite, elle considère la grammaire en termes de conceptualisation ; et enfin, elle affirme que la connaissance du langage provient de l'usage du langage.

En 1959, Chomsky a critiqué le livre *Verbal Behavior* (comportement verbal) de Burrhus F. Skinner (1904-1990) et a remis en question l'approche comportementale et réflexe de l'étude de l'esprit et du langage des années 1950. Ses travaux ont eu une grande influence en philosophie du langage et de l'esprit ; il pensait qu'appliquer les principes behavioralistes, issus de la recherche animale, à l'homme, n'a aucun sens. Pour comprendre un comportement complexe il faut avant tout reconnaître qu'il y a dans le cerveau des entités inobservables qui en sont fondamentalement responsables.

Il va s'opposer avec force à Jean William Fritz Piaget (1896–1980), un psychologue, épistémologiste (étude de la philosophie des sciences et en particulier la théorie de la connaissance en général). Ce suisse connu pour ses travaux en psychologie du développement a défini ce qu'il a appelé "l'épistémologie génétique"



pour décrire l'acquisition de la connaissance chez l'enfant comme une construction successive liée au développement du cerveau. Ses travaux lui ont fait dégager quatre stades dans ce développement de l'enfant :

- la période de l'intelligence sensori-motrice (de la naissance à 2 ans) ;
- la période de l'intelligence préopératoire (de 2 à 6 ans) ;
- la période des opérations concrètes ou de l'intelligence opératoire (de 6 à 10 ans) ;
- la période des opérations formelles (de 10 à 16 ans).

Au cours d'une réunion du 10 au 13 octobre 1975, à l'abbaye de Royaumont, comprenant des psychologues, linguistes, philosophes, neurologues...on verra se confronter deux conceptions opposées de la genèse de la pensée et du langage, d'un coté l'innéisme de Chomsky et de l'autre, le constructivisme de Piaget.. A l'époque, Jean Piaget a 79 ans et Noam Chomsky, 47 ans. L'un est dans la force de l'âge et l'autre déjà âgé. Chomsky soutient l'existence de compétences mentales innées, inscrites dans le cerveau de l'homme. Piaget à l'inverse croit que les capacités cognitives de l'humain ne sont ni totalement innées, ni totalement acquises. Elles résultent d'une construction progressive où l'expérience et la maturation interne se combinent.

En France la cognition sera officiellement reconnue par le Ministère de la Recherche quand il créera un programme "Cognitique" sous la direction de Catherine Fuchs de 1999 à 2002. Cette action incitative financera de nombreuses équipes françaises ; elle contribuera à l'ancrage de la discipline dans les laboratoires. L'objectif du programme a constitué un maillage interdisciplinaire d'équipes de recherche sur différents thèmes d'études relevant des sciences cognitives. Ce programme a développé une certaine interdisciplinarité entre la linguistique et l'informatique ou entre la psychologie et les neurosciences, ainsi qu'entre l'anthropologie, l'éthologie, la sociologie.

L'une des grandes figures de cette nouvelle discipline a été Marc Jeannerod (1935-2011). Professeur de physiologie à l'Université Claude Bernard de Lyon, il a dirigé l'unité Vision et motricité de l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM) jusqu'en 1997. Il a été à l'origine et a dirigé le premier l'Institut des Sciences Cognitives UMR 5015 du CNRS. Ce fut dans les années 2000, un très grand centre interdisciplinaire, au rayonnement international (fig.3).

### **III – Voies nouvelles de la cognition : l'esprit et la conscience...**

A partir des années 1980, la cognition va s'attaquer à des problèmes encore plus fondamentaux et touchant les principales fonctions de l'esprit. C'est un tournant fondamental dans la recherche scientifique. Alors qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, avec Watson s'intéresser à l'esprit paraissait à proscrire, l'analyse des sentiments les plus intimes par les scientifiques devenait un sujet privilégié.

#### **III.1 – Vers la conscience**

Tout commence avec Robert Ryle (1900-1976) et son livre "*The Concept of Mind*" publié en 1949 lancé le concept de la philosophie de l'esprit, sa structure, ses fonctions et ses propriétés mentales ; on précise ses rapports avec le corps et le cerveau. De tels travaux ont débouché sur les sciences cognitives. Antonio Damasio, dans son livre "*L'erreur de Descartes*" (1995), montre que le corps et l'esprit

fonctionnent de manière indissociable, que l'un ne peut être séparé de l'autre ; une action de l'esprit a toujours un support matériel au niveau du corps. De plus de telles activités se trouvent sans cesse sous la domination des émotions.

Francisco Varela (1946-2001), disciple de Humberto Maturana (1928-), en se basant sur la structure des cellules animales ou végétales considère la matière vivante, à la base de l'esprit comme un système autopoïétique ; c'est-à-dire, capable de se reproduire en permanence et en interaction avec son environnement, et ainsi de maintenir son organisation malgré le changement des composants. En défendant une telle organisation du vivant qui se régénère par lui-même, il pense à une cognition incarnée ou "énaction" qui considère l'adaptation active de tout organisme vivant comme une interaction connaissance/action et vice-versa. Varela dira dans une interview : "*L'approche dynamique travaille avec des variables biologiques, avec des activités neuronales plutôt qu'avec des symboles, avec des états globaux du cerveau appréhendés par l'imagerie fonctionnelle.*"

Chez les Anglo-Saxons, il existe deux mots pour désigner la conscience :

- *awareness* désigne l'éveil, la conscience-attention, le fait d'être en état de vigilance (par opposition à l'état de sommeil) ;
- *consciousness* renvoie à la production de pensées, de représentations mentales. En explorant les "états mentaux" et les "stratégies mentales", les sciences cognitives ont favorisé l'étude de la conscience.

Depuis 1990 un très grand nombre de publications paraissent sur le sujet qui devient même très à la mode. On peut citer John C. Eccles, "*Evolution du cerveau et création de la conscience*", Fayard, 1992, Daniel C. Dennett, "*La conscience expliquée*", Odile Jacob, 1993 ; Jean Delacour, "*La Biologie de la conscience*", Puf, "Que sais-je ?", 1994..., G. Tononi et S. Laureys "*The neurology of consciousness*" 2008....Benjamin Libet 2012 "L'esprit au delà des neurones."...

Un tel développement sera favorisé par l'initiative de la fondation privée américaine Alfred P. Sloan créée par Alfred Pritchard Sloan Jr (1875-1966) en 1934. En 1975, cette fondation donnera 20 millions de dollars pour toutes les recherches sur la cognition engagées aux Etats-Unis. Elle aidera à la création de la revue, "*Cognitive Science*" avec un premier numéro publié en 1977 et facilitera en 1979 la création d'une société savante. La fondation démontrera que les sciences cognitives en 1978 font intervenir différentes disciplines : philosophie, intelligence artificielle, psychologie, linguistique, neurosciences, anthropologie...

Le colloque de Cérisy (1987) montrera que la France n'est pas en reste. Sous le titre "*Nouvelle science de l'esprit*", la revue "Le Débat" publie un dossier spécial. En 1987, le colloque de Cérisy dirigé par Daniel Andler, avec la collaboration de Jean-Pierre Dupuy (1941-) et de Francisco Varela, officialise la discipline . Sous le titre "*Approches de la cognition*" la réunion a lieu du 6 au 15 juin.

### III.2 – Esprit et modularité

Jerry Fodor va développer une hypothèse originale sur la théorie de l'esprit dans son livre "*Modularity of mind*" (La Modularité de l'esprit, Minuit, 1986). Il reprend l'idée de diverses facultés mentales et souligne l'originalité du fonctionnement de l'esprit avec un ensemble de modules spécialisés destinés chacun à un type particulier d'opération. Cette théorie définit les processus cognitif et les états mentaux – connaissance, croyance, désir, intention, etc. – caractérisant un individu.

Elle permet ainsi de prédire ses propres attitudes et ses actions ainsi que celles des autres. Fodor se veut l'homme de la modularité qu'il peut confirmer par les différentes aires cérébrales définies dans le cerveau.

On peut stimuler directement le cerveau pour lier la pensée à l'action. En temps normal chez le sujet sain, tout se fait de façon automatique. Par contre, le fonctionnement est plus délicat chez des traumatisés crâniens qui compensent leurs déficits par une prothèse commandée directement par les neurones du cerveau. Dans ce cas il faut :

- 1) obtenir un enregistrement multiunitaire (entre cent et mille neurones) fidèle de longue durée et dans la plupart des régions du cerveau sans léser le tissu nerveux alentour. Il permet de connaître précisément comment sont activés les centres cérébraux ;
- 2) transformer ces signaux en algorithmes capables de commander un système artificiel à multiples degrés de libertés ;
- 3) mettre au point un apprentissage permettant d'adapter la prothèse à l'activité électrique cérébrale.

Avec un tel dispositif, la prothèse est directement commandée par la pensée.

Une équipe du laboratoire d'Alan C. Evans (Université McGill, Canada) vient de proposer une analyse de l'architecture modulaire du cortex humain. Un algorithme d'analyse automatique des réseaux a permis de dégager 45 régions et 102 connexions formant des clusters fonctionnellement cohérents. Une seconde analyse a détecté l'existence de modules rassemblant certaines de ces régions: Il en ressort six ensembles regroupant chacun 4 à 10 régions corticales. Le module I (9 régions), rassemblant des régions préfrontales, correspond aux fonctions exécutives et stratégiques. Le module II (10 régions), dans le cortex pariétal et (pré)moteur, renvoie aux fonctions spatiales et sensorimotrices. Le module III (4 régions), sur le gyrus fronto-orbital et temporal inférieur, serait associé aux fonctions olfactives. Le module IV (7 régions), rassemblant notamment le gyrus para-hippocampique et ses zones adjacentes, correspond aux processus de mémorisation et d'émotion. Le module V (10 régions) rassemble les aires connues pour l'audition et le langage, le module VI (5 régions) correspondant au cortex visuel. (Chen Z.J. et al. (2008), Revealing modular architecture of human brain structural networks by using cortical thickness from MRI, *Cerebral Cortex*, 18(10), 2374-2381).

De nouvelles disciplines vont ainsi prendre un essor caractéristique.

### III.3 – Des sciences nouvelles

*L'informatique cognitive* - Des puces ultraperformantes permettent des activités "humaines": composées de circuits intégrés en silicium, gravés à l'échelle nanométrique, leurs traits mesurent 45 millièmes de millimètre. Elles contiennent deux noyaux, l'un avec 262 144 circuits programmables, l'autre avec 65 536 circuits d'apprentissage. Ces circuits, appelés synapses, effectuent des tâches binaires massivement parallèles, ces circuits intégrés ont vocation à "apprendre". Leurs copies de neurones peuvent, comme nos cellules cérébrales, se connecter et se déconnecter de manière dynamique suivant les données qu'elles reçoivent. IBM veut aller plus loin encore et lancer un projet de recherche en informatique cognitive avec quatre universités américaines pour concevoir des ordinateurs fonctionnant à la manière d'un cerveau humain.

*La philosophie cognitive* (Joelle Proust et Pacherie) - Le but de la philosophie cognitive est de s'interroger sur la contribution de la philosophie en tant que partie d'un projet collectif d'élucidation des capacités cognitives des organismes qui en sont pourvus. Un des courants les plus actifs de la philosophie cognitive s'inspire du naturalisme, en vertu duquel la philosophie doit adapter ses concepts à l'état contemporain du savoir, et renoncer aux formes de légitimation qui seraient incompatibles avec celles qui sont mises en œuvre dans les sciences de la nature.

*L'anthropologie cognitive* - Pascal Boyer la définit ainsi : "*L'étude des processus cognitifs [...] permet[tant] de reformuler beaucoup de problèmes anthropologiques classiques en donnant la possibilité d'émettre des hypothèses plus précises sur l'acquisition et la transmission des représentations culturelles.*" Cette anthropologie s'appuie sur notre langue maternelle, les récits qui nous sont racontés, les arts et traditions savantes dont quelques-uns d'entre nous deviennent des virtuoses, les techniques et les objets de la vie quotidienne. L'anthropologie cognitive utilise souvent les problématiques de la philosophie, de la linguistique et de l'ethnographie, comme le dit Francis Zimmermann, directeur d'études à l'EHESS.

*L'imagerie cognitive* - Les expériences réalisées par Stanislas Dehaene et Jean-Pierre en imagerie sur des Portugais et Brésiliens cultivés, des illettrés et des anciens illettrés. "*Est-ce que la culture développe les fonctions cérébrales?... La plupart des modifications ont lieu quand la culture est acquise au cours de l'adolescence démontrant que chez les jeunes comme chez les adultes l'éducation peut profondément remodeler l'organisation du cerveau*". La question que l'on peut se poser est de savoir comment le cerveau s'est transformé avec la civilisation. On sait qu'en gros, c'est à partir de - 3500 av. J.C. que les peuples du Moyen-Orient ont commencé à se développer intellectuellement pour arriver aux cultures antiques égyptiennes, grecques et latines ; civilisations reprises et amplifiées au cours des deux premiers millénaires après J.C. *Cerveau et machines artificielles* : John Creavant fonde en 1998 la *Celera Genomics* avec le soutien de la société Perkin-Elmer dont l'objectif est de séquencer le génome humain, entrant ainsi en compétition avec le consortium public international. En 2000 Venter et Celera annoncent avoir fini de séquencer le génome, en même temps que le consortium international. En 2002, Venter quitte Celera et monte le J. Craig Venter Institute. Ses nouveaux objectifs sont d'explorer la biodiversité génomique et de parvenir à recréer un organisme vivant synthétique en laboratoire.

Deep Blue est l'aboutissement du projet ChipTest, lancé par les étudiants Feng-hsiung Hsu Murray Campbell et Thomas Anantharaman au laboratoire de l'Université Carnegie-Mellon en 1985. Renommé Deep Thought en 1988, le projet est devenu Deep Blue en 1993. Le 10 février 1996 "Deep Blue" a été la première machine à gagner aux échecs contre un champion. Cependant dans cinq jeux suivants le champion de 33 ans Garry Kasparov en a gagné trois. Il a fini par battre la machine par le score de 4-2. Le 11 mai 1997 après amélioration de "Deeper Blue" une nouvelle confrontation a eu lieu gagnée par la machine avec le score final de 3,5 à 2,5. Deep Blue a ainsi été la première machine à battre un champion.

*L'humanoïde Ibert Hubo* - Version améliorée du robot humanoïde sud-coréen Hubo. Il a été développé par KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology), il mesure 1,37 mètre et pèse 60 kg. Il possède la particularité d'être

pourvu du visage d'Albert Einstein. Sa tête comporte 31 servomoteurs lui permettant de reproduire plusieurs expressions du visage. Il est équipé d'un système de reconnaissance vocale mais sa fonction parole est toujours en cours de développement. Enfin, il peut marcher à une vitesse de 1,5 km/h et bouger ses 5 doigts. La conception de ce robot aura duré 3 ans et coûté 1 million d'euros soit 299 millions de moins qu'Asimo.

## Conclusion

L'avenir paraît prometteur ; les sciences cognitives sont maintenant bien ancrées dans toutes les recherches de pointe. Elles ont leurs méthodes propres et savent parfaitement s'adapter à toutes les techniques nouvelles. Deux projets méritent d'être mentionnés pour l'espoir qu'ils suscitent dans la compréhension des mécanismes fonctionnels du cerveau.

*Le Connectome* - En 2005, le Dr Olaf Sporns à l'université de l'Indiana et le Dr Patrick Hagmann à l'hôpital universitaire de Lausanne ont proposé le terme "connectome" pour parler de toutes les connexions neuronales dans un cerveau. La connectomique (Hagmann, 2005) a été définie comme la science qui s'intéresse à l'assemblage et l'analyse de données de connectomes. *"Pour comprendre le fonctionnement d'un réseau, on doit connaître ses éléments et ses interconnexions. Le but de cet article est de discuter des stratégies de recherche dans le but de faire une description complète de la structure d'un réseau d'éléments et de connexions qui forment le cerveau humain. Nous proposons d'appeler ces données "connectome", et nous pensons qu'il est fondamentalement important dans les neurosciences cognitives et en neuropsychologie."* Olaf Sporns. Les recherches sur le connectome humain portent à la fois sur l'architecture des fibres du cerveau comme le montre l'imagerie par diffusion (à gauche), sur l'architecture des réseaux de neurones reconstruit (au milieu) et sur la location des nœuds des réseaux très interconnectés.

*Le projet Blue Brain*, littéralement "cerveau bleu", a pour objectif de créer un cerveau synthétique par processus de rétro-ingénierie. Fondé en mai 2005 à l'École Polytechnique de Lausanne en Suisse, ce projet étudie l'architecture et les principes fonctionnels du cerveau. En 2002, Henry Markram s'installe à l'EPFL ; en 2005, il convainc IBM de constituer une équipe internationale de 35 informaticiens, mathématiciens, biologistes et physiciens. En 2008, les chercheurs ont achevé la première étape du projet : ils sont parvenus à traduire sous forme de données mathématiques les propriétés biologiques d'un fragment de cerveau de rat ; ils ont modélisé 10 000 neurones virtuels connectés entre eux par 30 millions de synapses et quelques kilomètres de fibres. Selon Henry Markram, le premier cerveau virtuel de mammifère serait disponible vers 2018. Cette reconstitution virtuelle d'une colonne corticale, c'est-à-dire l'unité de base du cortex constituée de milliers de neurones. "Cela nous a permis d'identifier 240 types de neurones.

Cette vision optimiste sur la connaissance du cerveau s'appuie sur la puissance de calcul de la prochaine génération de supercalculateurs qui atteindra un million de milliards d'opérations par seconde, sur 450 m<sup>2</sup> et consommera 3 millions de watts pour un coût de 3 millions de dollars par an.

- La connaissance du système nerveux passe par des défis successifs :
- dans les années 1950, on recherchait la connectivité, “le cerveau câblé” ;
  - dans les années 1960-1980, on analysait les neurotransmetteurs “le cerveau humide” ;
  - aujourd’hui, on tente une approche globale, des mécanismes moléculaires à la cognition, des connections inter-cellulaires les plus fines aux fonctions cérébrales les plus élaborées.

### BIBLIOGRAPHIE :

Clarac, F., Ternaux, J.P. 2008. Encyclopédie historique des neurosciences. **Du neurone à l'émergence de la pensée. De Boeck éditions. P.1009**

Gardner, Howard 1993. *Les intelligences multiples : La théorie qui bouleverse nos idées reçues*. Payot

Held R., Hein A.: *Movement produced stimulation in the development of visually guided behavior*. J. Comp. Physiol. Psychol., 56: 872-876, 1963.

Paillard J.: *Tonus, posture et mouvement, 1976*. pp. 521-728. In: Kayser Ch. (éd.) *Traité de psychologie*, tome III, ch. 6, 3<sup>e</sup> éd., Flammarion, Paris.

Paillard, J. 1980. *Le corps situé et le corps identifié. Une approche psychophysiologique de la notion de schéma corporel* Rev. Méd. Suisse Romande, 100: 129.141, 1980

Parent, A. 2009. Histoire du cerveau : De l'Antiquité aux neurosciences. Chronique Sociale, P.U.L.

**Ramon y Cajal, S. 1894.** “*Les nouvelles idées sur la structure du système nerveux chez l'homme et chez les vertébrés* (Édition française revue et augmentée par l'auteur, traduite de l'espagnol par le Dr L. Azoulay), Reinwald & Cie (Paris), 1 vol. (XVI-200 p.).

Ramon y Cajal S. 1909-1911 “*Physiologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés. Généralités, moëlle, ganglions rachidiens, bulbe et protubérances* (traduction en français par le Dr Léon Azoulay), A. Maloine (Paris), , 2 vol. (XIV-986, 993 p.)