



HAL
open science

Bases biologiques du traitement cognitif de l'information. Pour repenser l'éducation

Geneviève Vens-Wagner, Monique Le Guen

► **To cite this version:**

Geneviève Vens-Wagner, Monique Le Guen. Bases biologiques du traitement cognitif de l'information. Pour repenser l'éducation. 2005. halshs-00197116

HAL Id: halshs-00197116

<https://shs.hal.science/halshs-00197116>

Submitted on 19 Dec 2007

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

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



UMR 8595

C
a
h
i
e
r
s
de
la
M
S
E

**Bases biologiques du traitement cognitif
de l'information Pour repenser l'éducation**

Geneviève VENS-WAGNER
Monique LE GUEN, MATISSE

2005.81



Maison des Sciences Économiques, 106-112 boulevard de L'Hôpital, 75647 Paris Cedex 13
<http://mse.univ-paris1.fr/Publicat.htm>

ISSN : 1624-0340



BASES BIOLOGIQUES DU TRAITEMENT COGNITIF DE L'INFORMATION

POUR REPENSER L'ÉDUCATION

Geneviève VENS-WAGNER* & Monique LE GUEN**

Rapport de Recherche
Cahiers de la Maison des Sciences Economiques
MATISSE Série Rouge n° 2005.81

* GENEVIÈVE VENS-WAGNER, Professeur Biologie-Géologie, expérience de re-motivation culturelle par le bio-logique. Email : gene.wagner@neuf.fr

** MONIQUE LE GUEN, Ingénieur Recherche Traitement de l'information, CNRS-MATISSE¹ - UMR8595, Enseignement de la Statistique par la Visualisation et l'Interactivité. Email : leguen@univ-paris1.fr

¹ MATISSE - CNRS (UMR 8595), Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne, Maison des Sciences Economiques, 106-112 Bd. de l'Hôpital, 75647 Paris CEDEX 13, France. <http://mse.univ-paris1.fr/>, <http://matisse.univ-paris1.fr/leguen>

Résumé

Bases biologiques du traitement cognitif de l'information Pour repenser l'éducation

Comment faciliter les apprentissages, améliorer et généraliser les transferts de connaissance ? Comment favoriser notre créativité ? Ce sont des enjeux économiques pour le XXI^e siècle.

Dans cet article nous rappelons comment la mise en place du cerveau est une émergence du processus évolutif du vivant, comment le développement cérébral est lui-même dépendant de son environnement global. Nous nous attardons sur la plasticité cérébrale sans laquelle il n'y a ni apprentissage, ni mémorisation, ni souvenirs, ni création culturelle possible. Nous montrons comment la logique mathématique elle-même ne se déroule qu'en prenant appui sur des souvenirs perceptifs encodés sous forme potentielle dans notre « connectique » neuronale innée et acquise selon des imageries mentales individuelles.

Ce survol des acquis récents en neurobiologie ouvre la voie à la « neuropédagogie cognitive » avec pour retombée un espoir d'amélioration des systèmes d'apprentissage.

Mots Clés : Cerveau, plasticité cérébrale, science cognitive, neuropédagogie cognitive, images mentales, apprentissage, intelligences multiples, éducation, re-médiation.

Abstract

Biologic bases of cognitive treatment of information. To rethink education

How to facilitate how we learn? How to improve and generalize knowledge transfers? How to increase our creativity? These questions are the economic stakes of the 21st Century.

In this article we present how the brain development is the result of evolutionary process of the alive, and how the brain development is itself dependent on its surrounding environment. We will further explain the plasticity of the brain that allows us to acquire new knowledge and skills through instruction or experience – without brain plasticity and its capacity to change with learning any learning, nor memorization, nor memories, nor cultural experiences would be possible. Finally, we will demonstrate how the development of mathematical logic relies on perceptive memories that have been embedded as “potential memories” in our innate or acquired neuronal “connectivity” thanks to individual mental pictures.

With this recent learning in neurobiology, the path that leads to the “cognitive neuropedagogy” is now opened.

Key Words : brain, brain plasticity, cognitive science, cognitive neuropedagogy, mental images, learning, multiple intelligence, education, re-mediation.

Code JEL : C00 ; I20 ; D83.

Remerciements

Nos plus vifs remerciements seront pour HÉLÈNE TROCMÉ FABRE, qui par ses écrits, ses réalisations cinématographiques et nos rencontres nous a permis d'avancer dans nos recherches et nous a soutenues dans nos convictions.

Pour faciliter la compréhension de notre texte nous avons dû emprunter certaines images et graphiques à plusieurs auteurs que nous remercions vivement pour leur apport.

Plan

LE CERVEAU, OBJET FAMILIER, OBJET MÉCONNU	4
I. LA LIGNÉE HUMAINE, HISTOIRE & TRANSMISSION CULTURELLE	6
I.1. HISTOIRE D'UN PRIMATE AU CERVEAU HYPERTROPHIÉ.....	6
I.2. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME NERVEUX CHEZ LES VERTÉBRÉS.....	6
I.3. ONTOGÈNESE DU LANGAGE CHEZ L'ENFANT.....	8
I.3.1. Primate social et langage articulé.....	8
I.3.2. La révolution cognitive des neuf mois.....	8
I.3.3. Récapitulatif de l'ontogène des capacités langagières.....	8
I.3.4. Incidents de parcours au cours de l'ontogène.....	9
I.3.5. Le langage, premier artefact culturel.....	9
II. LES BASES BIOLOGIQUES ÉLÉMENTAIRES DU FONCTIONNEMENT CÉRÉBRAL	10
II.1. LE CERVEAU, OUTIL D'ADAPTATION À L'ENVIRONNEMENT.....	10
II.1.1. Généralités.....	10
II.1.2. Le cerveau contrôle tout.....	10
II.2. ORGANISATION ANATOMIQUE ET FONCTIONNELLE DU CERVEAU, LE TISSU NERVEUX.....	11
II.2.1. Le neurone et ses synapses.....	11
II.2.2. Nature et propagation du message nerveux.....	12
II.2.3. Les synapses chimiques et leurs fonctions.....	13
II.2.4. Le neurone fonctionne comme un microprocesseur biologique.....	15
II.2.5. Comment s'établissent les réseaux de neurones.....	15
II.2.6. Des réseaux innés non spécifiques aux réseaux spécifiés par l'expérience.....	16
II.2.7. Gènes et connexions neuronales.....	16
III. APPRENTISSAGES, MÉMORISATIONS.....	16
III.1. L'APPRENTISSAGE SIMPLE PAR CONDITIONNEMENT CHEZ UN MOLLUSQUE (INVERTÉBRÉ).....	16
III.2. LES MÉMOIRES ET LES APPRENTISSAGES CHEZ L'HOMME.....	17
III.2.1. Une classification des mémoires.....	18
III.2.2. Le Codage de l'information.....	19
III.2.3. Les aires cérébrales concernées.....	20
III.2.4. Biophysique et biochimie de la mémoire.....	21
III.2.5. Facteurs agissant sur l'apprentissage et la mémorisation.....	22
III.3. MÉMORISATION ET IMAGES MENTALES.....	22
III.3.1. Perception et Représentations du corps, les cortex primaires et leurs images.....	23
III.3.2. Des images perceptives sensorielles aux images mentales.....	24
III.3.3. Des images perceptives primaires aux images mentales, Comment se réalise l'intégration?.....	26
III.3.4. Un modèle biologique, le noyau dynamique d'EDELMAN.....	26
III.4. INTELLIGENCES, ACTIVITÉS CÉRÉBRALES ET MATHÉMATIQUE.....	27
III.4.1. Mathématique et intelligence visuo-spatiale.....	27
III.4.2. Intelligence linguistique et logique.....	30
III.4.3. Les mathématiques, art et artefact.....	30
III.4.4. Créativité et Mathématique.....	32
III.4.5. Créativité et Innovation.....	34
IV. PRISE EN COMPTE DES ACQUIS COGNITIFS DANS LA CULTURE ACTUELLE	34
IV.1. LES DONNÉES NOUVELLES.....	34
IV.2. RÉÉDUCATION FONCTIONNELLE PAR ACTIVATION DE « L'IMAGERIE MENTALE ».....	36
IV.2.1. L'entraînement mental des sportifs de haut niveau.....	36
IV.2.2. Piloter un ordinateur par la seule pensée volontaire.....	36
IV.3. AUTRES RETOMBÉES « CULTURELLES » ACQUISES.....	37
IV.3.1. La culture nous modèle.....	37
IV.3.2. La créativité humaine n'a pas de limite.....	37
IV.4. APPLICATIONS À L'ENSEIGNEMENT ET À L'ÉDUCATION.....	37
CONCLUSION.....	38
RÉFÉRENCES.....	40
ANNEXE SCHÉMAS DU CERVEAU.....	43

Avant-propos

*A truth passes through three stages.
First, it is ridiculed.
Second, it is violently opposed.
Third, it is accepted as being self-evident.*

ARTHUR SCHOPENHAUER

Comment faciliter les apprentissages, améliorer et généraliser les transferts de connaissance ? Comment favoriser notre créativité ? Ce sont des enjeux économiques pour le XXI^e siècle. Ces enjeux sont indissociables de la culture. Notre culture s'appuie sur les artefacts culturels qu'elle crée continûment et sur leur transmission cumulative. Les structures économiques, les mathématiques, les méthodes statistiques..., sont des artefacts² culturels.

Quels outils préparent à la mise en place de ces artefacts ? Le premier nous semble être le cerveau. Il est la pierre angulaire qui fait de l'homme le maillon créateur, mais aussi la pierre d'achoppement qui fait de lui aussi le maillon faible.

Percevoir, imaginer, comprendre, agir, rien ne se réalise en l'homme et par l'homme, sans le support cérébral.

Le Cerveau, Objet familier, Objet méconnu

*L'être humain est à la fois un individu biologique, un acteur social, et un sujet en quête de sens et de liberté intérieure. Ces trois facettes se déploient, chacune dans un environnement différent, par **interactions** à la fois **adaptées** et **adaptatives** dans et par un environnement particulier : l'environnement matériel, le milieu social et un mode intérieur privé.*

Cette phrase³ de KARLI P. résume l'histoire évolutive de notre humanité. La coordination entre ces trois facettes est assurée par un seul système, le cerveau, qui contrôle le tout sans jouer le rôle de superviseur.

Ce cerveau est pour nous un objet familier puisqu'il fait partie de la dotation naturelle de chacun d'entre nous. C'est « l'outil premier (princeps) » à l'origine de toutes nos créations culturelles, mais pour la plupart d'entre nous c'est un outil méconnu. C'est un outil si particulier que 6,5 milliards d'individus sur terre font, 6,5 milliards d'outils cognitifs différents. Il n'existe pas deux cerveaux humains identiques, même deux jumeaux homozygotes acquièrent déjà in utero une configuration cérébrale différente.

Si notre histoire biophysique et biochimique remonte à plus de 4 milliards d'années, l'histoire biologique de notre cerveau a commencé il y a moins d'un demi-milliard d'années. De cette longue histoire a émergé cette structure complexe dont les potentialités sont si larges qu'elles ont à leur tour autorisé chez notre espèce une innovation remarquable : le langage articulé qui nous différencie de tous les autres primates. Le langage articulé est le premier « artefact culturel » que notre espèce « installe ». Le langage est un artefact car son développement exige un transfert culturel par le jeu nécessaire **d'interactions sociales** répétées.

Notre cerveau, et en particulier notre néocortex, possède la propriété atypique dans le règne animal, de pouvoir se modeler sur son environnement. Cette adaptation de survie, ce modelage adaptatif à l'environnement, **notamment culturel**, est sous la dépendance « instructive » des artefacts culturels sociaux rencontrés et de leurs variétés. Ce modelage se fera donc sur un mode **original et personnel**.

² Artefact au sens biologique de non inné mais acquis, vient du *latin artis factum* « fait de l'art » - phénomène d'origine humaine, capacité (compétence ou objet fabriqué) acquis de culture.

³ KARLI P. (2002), «Le cerveau des affects et des émotions», in *Université de tous les savoirs, le Cerveau, le Langage, le Sens*, O. Jacob, pp 97-111.

Depuis plus de 2500 ans les pédagogues réfléchissent sur les conditions, les méthodes d'enseignement et de transmission culturelle. Les enjeux actuels viennent de la constatation que les savoirs intellectuels essentiels lire, compter, écrire, sont devenus bien insuffisants pour survivre socialement dans le monde technologique complexe et psychologiquement anxiogène que nos artefacts culturels contribuent à « structurer ».

-1- Comment faciliter les apprentissages ? -2- Améliorer ? -3- Généraliser les transferts de connaissance ?

Les nouvelles technologies, les connaissances cognitives acquises depuis une quinzaine d'années, le changement de perspective qui devrait en résulter concernant la **précarité culturelle**, et surtout l'émergence balbutiante d'une prise de conscience en matière de responsabilité environnementale attestent que nous sommes dans ces domaines - de transferts culturels- déjà engagés dans une transition planétaire majeure et délicate.

Nous voudrions à partir de nos acquis respectifs montrer comment notre connaissance de la biologie évolutionniste et la compréhension des bases biologiques du fonctionnement cérébral nous ont permis en les communiquant à nos apprenants de relancer en eux la dynamique de sens et d'espérance en eux-mêmes et les autres sans lesquelles aucune motivation à construire son savoir n'a de sens, sauf à recourir à la peur ou à la pression sociale de « culture » imposée de l'extérieur.

Dans une première partie nous rappellerons comment la mise en place du cerveau est inséparable de l'évolution biologique des espèces, comment le développement cérébral est dépendant du contexte environnemental. Nous rappellerons que le langage est le support privilégié de ces artefacts et qu'il est lui-même, ce qui n'est pas intuitif, le premier des artefacts culturels.

Instruits sur l'ontogenèse du langage, nous serons amenés dans une deuxième partie, à nous intéresser à la structure du tissu nerveux, à ses propriétés (excitabilité, conduction, capacité à configurer et reconfigurer les réseaux d'information, capacité acquise par la réinformation permanente du cerveau par lui-même).

Dans une troisième partie nous nous attarderons sur la plasticité cérébrale sans laquelle il n'y a ni apprentissage, ni mémorisation, ni souvenirs, ni création culturelle possible.

Nous verrons aussi que notre vision cartésienne des « pensées » est en désaccord avec la réalité biologique : la logique mathématique elle-même ne se déroule qu'en prenant appui sur des souvenirs perceptifs encodés sous forme potentielle dans notre « connectique » neuronale innée mais aussi acquise, selon des imageries mentales individuelles.

Dans une dernière partie nous montrerons que seuls quelques domaines culturels ont pris la mesure de ces données nouvelles, à ce jour l'économie a devancé l'humain.

Récemment une voie s'est ouverte vers la « *neuropédagogie cognitive* ». Celle-ci conforte certaines pratiques éducatives et apporte une perception nouvelle sur les compétences multiples des apprenants et la diversité des stratégies de connaissance. Cette approche n'en est qu'à ses débuts, elle devrait diffuser vers le monde éducatif et les développeurs de nouvelles technologies de l'information et de la communication, comme le souligne le récent rapport de l'OCDE 2002 «Comprendre le cerveau, Vers une nouvelle science de l'apprentissage».

Note

Pour ne pas alourdir le texte nous avons reporté en notes de bas de page, les explications un peu trop techniques, qui peuvent être délaissées lors d'une première lecture.

I. LA LIGNÉE HUMAINE, HISTOIRE & TRANSMISSION CULTURELLE

La biologie de l'homme et celle de son cerveau sont la mémoire de son histoire évolutive, de même, chaque cerveau est le produit inachevé de sa propre histoire pour reprendre l'expression d'Alain Prochiantz (2000). Pour commencer ce récit, empruntons à Albert Jacquard (1996) son *histoire d'un primate au cerveau hypertrophié* avec néanmoins une restriction. Cette présentation très raccourcie date aujourd'hui par rapport aux récentes théories de l'hominisation, en permanente révolution. Ainsi, notre arbre généalogique apparaît désormais comme un buisson où plusieurs espèces d'hominidés ont coexisté à différentes époques. Mais notre propédeutique, a pour but de rapporter en une demi-page, la démarche évolutionniste (interactions entre génétique et contraintes environnementales).

I.1. Histoire d'un primate au cerveau hypertrophié

L'homme est né d'une succession d'erreurs et d'accidents qui vont se changer, par hasards, en avantages qui conduiront certains hominidés à homo sapiens : le mammifère primate dont l'outil cérébral a la « malchance » d'être immature à la naissance.

Mais... ce sera ... sa chance évolutive et puis plus tard ...sa chance ou sa malchance éducative !

Il y a 6 millions d'années environ, en Afrique, quelques primates, du fait de mutations aléatoires acquièrent l'aptitude à se redresser (sans intérêt dans l'habitat forestier où ils vivent). Cet acquis deviendra environ 3 millions d'années plus tard un avantage décisif lorsque les conditions géologiques et climatiques modifieront l'écologie de leur habitat et leur ouvriront un vaste domaine herbeux sans trop de concurrence : la savane. Le handicap des *mutations acquises* devient dans ce nouveau contexte un avantage sélectif, une chance évolutive. La bipédie favorise la manipulation suivie d'objets et notamment l'utilisation « d'outils ». L'outil, objet « environnemental », améliore de l'extérieur cette fois, sa capacité à survivre. Son cerveau de primate (400 cm³), va devoir gérer un spectre plus large de perceptions internes et externes et de nouvelles aptitudes motrices ; son volume crânien atteint 600 à 700 cm³. Le cortex cérébral se plisse pour gagner de la surface en épaisseur. Nous sommes il y a -2 millions d'années environ.

Un million d'années plus tard environ, bipède exclusif, il maîtrisera le feu, construira des abris, communiquera socialement au moins par gestes afin de coordonner les activités de survie. Le cerveau s'est hypertrophié, vers l'avant frontal, pour gérer ces fonctions émergées de la vie en société, il atteint 900 à 1100 cm³.

Seul, isolé, notre primate au cerveau hypertrophié ne peut survivre. Il est désormais totalement dépendant du **maternage** et de l'**apprentissage** dispensés par l'instinct ou le bon vouloir de ses pairs. Ce nouvel handicap sera une « chance » pour les survivants **socialement chanceux**.

A ce stade, la vie en société est devenue pour homo sapiens une nécessité de survie. Le langage articulé va se développer, lui permettant l'optimisation de la communication intentionnelle, la gestion du présent mais aussi la remémoration du passé et la projection dans le futur, 100 000 ans à peine pense-t-on !

Il affine aussi ses capacités à mémoriser et à conceptualiser. Son cerveau déjà plissé (circonvolutions) ne peut plus gagner d'espace pour loger les milliards de connexions neuronales du système gestionnaire et se voit alors contraint de latéraliser ses fonctions, de **spécialiser ses deux hémisphères**. Son cerveau occupe désormais 1400 cm³.

I.2. Développement du système nerveux chez les vertébrés

Tout organisme vivant se construit aux dépens de son environnement et en interaction avec lui. Il prélève dans le milieu extérieur l'oxygène et les éléments nutritifs dont il a besoin pour se construire. Il y rejette ses déchets. Le premier milieu extérieur des organismes vivants fut la mer puis, apparut dans le règne animal un « milieu intérieur »⁴ qui fut canalisé puis mis en mouvement par une pompe accélérant les échanges vitaux du métabolisme (système circulatoire) et permettant, notamment aux

⁴ CLAUDE BERNARD créa en 1858 le concept de « milieu intérieur » (« *C'est dans le sang et dans les liquides qui en dérivent -lymphe- que la physiologie trouve la plupart des conditions pour l'accomplissement des actes physico-chimiques de la vie ...* »).

vertébrés⁵ de s'affranchir des variations physico-chimiques du milieu extérieur et de coloniser secondairement le milieu aérien et celui des eaux douces.

La mise en place de ce milieu intérieur, et les nouvelles fonctions de régulation apparues sont allées de pair avec une évolution des systèmes de contrôle de celles-ci, systèmes centralisés pour former le système nerveux⁶.

Pour clarifier la mémorisation des composantes du cerveau nous simplifierons en disant que, nous trouvons dans l'ordre chronologique d'apparition (voir le schéma du cerveau en Annexe) :

- La partie nerveuse la plus ancienne du système, la **moelle épinière**, qui gère les boucles réflexes : action-réaction (inné, stéréotypé).
- Puis en remontant vers l'avant céphalique, on trouve le **bulbe rachidien**, le **tronc cérébral** et le **cervelet** (premier petit cerveau) qui contrôlent respectivement : les fonctions viscérales involontaires (cœur, circulation, respiration ...), la digestion-déglutition, la coordination des mouvements, la mémorisation des réponses apprises (chez l'homme) et devenues automatiques et stéréotypées.
- Puis viennent les **couches sous-corticales** de substance grise (noyaux du sous-cortex) : le **thalamus** « met au point » toutes les informations sensorielles avant qu'elles ne parviennent au cortex, l'**hypothalamus**, chef d'orchestre de l'intendance et de toute la messagerie hormonale. A ce niveau cérébral interviennent aussi l'amygdale (régulation des émotions, apprentissage par punition-récompense) et l'**hippocampe** (reconnaissance des lieux, mémoire contextuelle et consolidation des souvenirs ...)
- Enfin vient le **cortex** qui regroupe les corps cellulaires des neurones, il est associé aux fonctions cognitives. Il constitue 40% de la masse cérébrale, son épaisseur varie entre 1,5 à 4,5 mm selon les aires, du fait des circonvolutions sa surface étalée représenterait 2,7m². Le **néocortex**, dernier niveau apparu chez les mammifères, permet d'associer des informations perçues avec des représentations non perçues. Il est le niveau intégrateur des niveaux inférieurs et de l'acquis de vie, le niveau le plus plastique du cerveau car modelable par l'environnement et par lui-même (connaître, comprendre, décider pour agir plutôt que réagir).

Nous reprenons le modèle, reproduit ci dessous, du triple cerveau proposé par PAUL MC LEAN car il « modélise » simultanément la dynamique évolutionniste et fonctionnelle. Ces trois entités, fortement interconnectées et interdépendantes peuvent cependant fonctionner de manière semi-indépendantes.

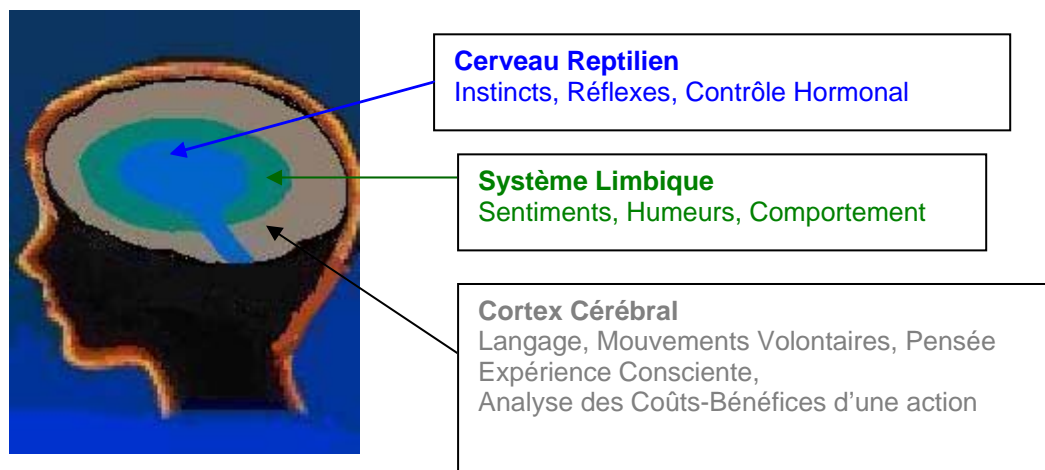


Schéma du Cerveau proposé par PAUL MAC LEAN

Ce modèle simplifié montre l'empilement emboîté des 3 cerveaux : *reptilien*, *mammalien-limbique*, et *néocortex*.

⁵ Poissons, puis batraciens (ère primaire), reptiles (ère secondaire), oiseaux mammifères (ère tertiaire), sapiens (ère quaternaire).

⁶ Système nerveux central = cerveau, système nerveux périphérique = nerfs

Avec BOWNDS⁷, et pour mémoriser nous schématiserons, la dynamique évolutionniste ainsi :

- Le cerveau **reptilien** le plus ancestral contrôle des comportements innés et instinctifs régulant la survie primitive (besoins et pulsions primaires végétatives de **survie**),
- Le vieux cerveau cortical mammalien ou **système limbique** qui exprime des systèmes de motivation innés et développés avec la vie animale sociale (attachement à nos proches et à notre site).
Ces « deux cerveaux » ancestraux interagissent avec :
- Le nouveau cerveau, le **néocortex**, qui traite des informations et de la connaissance déclarative du monde réel et phénoménal (mémoires, apprentissages et concepts acquis du vivant, en adéquation de survie⁸ avec l'environnement.

Pour illustrer la notion **d'artefact culturel**, nous aimerions revenir sur l'ontogenèse du langage chez l'enfant en reprenant les travaux de TOMASELLO (2004). Cet exemple de l'acquis langagier montre la dynamique de développement « bio-logique » qui fait constamment du **neuf**, en réponse aux sollicitations nouvelles de l'environnement, en s'appuyant sur **l'ancien acquis** qui sera alors repris et remanié.

1.3. Ontogenèse du langage chez l'enfant

1.3.1. Primate social et langage articulé

Comme les grands singes, avec lesquels il partage 98,6 % de son génome, l'homme est un primate social, il possède la « **conscience de soi** », c'est-à-dire la capacité de se reconnaître soi-même, et de communiquer par la gestuelle et le comportement. Mais il est le seul capable d'acquérir le langage articulé et plus tardivement, **la conscience qu'il possède des états mentaux**, ceux des autres pouvant être rapprochés des siens propres selon TOMASELLO. Cet état de conscience de l'autre est appelé par les psychologues « *Théorie de l'esprit* »⁹.

1.3.2. La révolution cognitive des neuf mois

La « révolution cognitive des neuf mois » **spécifique du primate humain** permet l'usage actif des symboles linguistiques et l'apprentissage **interactif** du langage.

Les capacités cérébralement requises sont, la capacité d'attention conjointe et l'aptitude cognitive à inverser les rôles, la capacité à « comprendre autrui comme un agent intentionnel »¹⁰, capacités auxquelles il faut ajouter la capacité cognitive « à extraire le sens des mots, puis des phrases » du seul contexte perceptif global. En effet l'enfant peut inférer le sens voulu à partir de nombreux indices du contexte non verbal et ce à force de répétition des scènes d'attention conjointes [DUNBAR, 2001].

1.3.3. Récapitulatif de l'ontogenèse des capacités langagières

Voilà ce que l'on peut constater chez tous les bébés :

Dès trois jours le bébé peut imiter les phonèmes « a-e » et « e » (bébé français), jusqu'à un mois il peut distinguer tous les phonèmes répertoriés (150), mais dans un environnement aux phonèmes réduits (35 en français) il perdra cette capacité par l'affaiblissement des connexions nerveuses, non renforcées.

A neuf mois, tous les enfants du monde s'identifient à autrui (sauf les grands autistes), le perçoivent à leur image, comme un agent intentionnel, s'engagent par imitation avec lui dans des activités d'attention conjointe, comprennent les intentions communicatives de cet autrui, apprennent les mêmes symboles et les mêmes constructions linguistiques.

⁷ BOWNDS M.D. (2001), « *La Biologie de l'Esprit, Origines et structures de l'esprit, du cerveau et de la conscience* », Masson Sciences, 322 pages.

⁸ **Survie physiologique** (homéostasie de CLAUDE BERNARD), **psychique** (intégration sociale-éthologie) et **spirituelle** (besoin de sens - philosophie).

⁹ La théorie de l'esprit repose sur la capacité d'attribuer à autrui, des intentions, des croyances, des désirs ou des représentations mentales.

¹⁰ Reconnaître les autres comme des **agents intentionnels**, c'est comprendre que leurs comportements sont en relation de causalité avec une intention et un but à atteindre. Cet autre étant identifié « comme autrui », c'est comprendre que l'on peut apprendre de cet autre, par identification et imitation.

Dès un an les tout-petits ont compris, entre autre, que l'ordre des mots véhicule des informations très importantes quant à leur signification. Sauf incident, à cinq ans la plupart des enfants parlent couramment et sans effort [KARMILOFF-SMITH 2004].

I.3.4. Incidents de parcours au cours de l'ontogenèse

Cependant de nombreux incidents peuvent se produire sur le parcours qui va, de l'inné des capacités requises héritées de nos ancêtres primates¹¹, aux **acquis interactifs** sociaux et culturels.

I.3.4.1. Les enfants sauvages

Chez les enfants sauvages, c'est une carence **en aval** (acquis) du processus de développement ontogénétique qui explique en partie l'absence de langage : **l'absence d'interactions entre humains** [MALSON, 2001].

Le docteur ITARD qui prit en charge l'enfant sauvage VICTOR de l'Aveyron (11 ans), réussit à lui apprendre¹² à « lire » et à « écrire » mais il ne réussit jamais à lui inculquer un langage normal.

Ce ne sont pas les mêmes bases neuronales qui interviennent dans le langage (acquis primaire fonctionnel) et la lecture-écriture (acquis culturel secondaire : conventions symboliques).

I.3.4.2. Les enfants autistes

Les enfants autistes n'ont pas accès à l'apprentissage par imitation, faute d'identification convenable pense-t-on, à autrui et ce, par incapacité à pouvoir reconnaître les expressions émotionnelles d'autrui. Ce déficit biologique de perception, **en amont** (potentiel perceptif inné), empêche sans doute la socialisation puisqu'il rend inefficaces les interactions sociales, qui en sont une condition essentielle [GRANDIN, 1997].

L'autisme apparaît comme un trouble complexe du développement où des difficultés initiales, très en amont dans l'ontogenèse du langage, empêchent l'enfant de tirer parti des expériences qui alimentent les développements cognitif et social chez les enfants non autistes.

Selon Josiane KINDYNIS, « il faut effectivement leur enseigner différemment, notamment par association et non par imitation »¹³.

I.3.5. Le langage, premier artefact culturel

TOMASELLO rappelle tout au long de son ouvrage que nos cultures reposent sur une culture de langage et que le langage se révèle être **le premier des artefacts culturels**. Les artefacts culturels peuvent s'accumuler (accrétions cumulatives) de génération en génération à condition d'être **socialement** transmis, assimilés et ainsi plus certainement conservés¹⁴.

Rappelons que *les réseaux neuronaux de l'enfant sont très partiels et limités*, sans rapport avec les circuits complexes de l'adulte. Le poids du cerveau de l'enfant triple avant l'âge de cinq ans et les 9/10^{ème} des circuits du néocortex sont élaborés après la naissance à raison de dizaines de millions de connexions synaptiques chaque seconde dans certains territoires [PAUEN 2003]. Cette activité est à mettre en relation avec l'activité métabolique du cerveau (objectivée en imagerie fonctionnelle).

Chez l'adulte le cerveau représente 2% de la masse corporelle et utilise 25 % de l'oxygène¹⁵. Chez le jeune enfant, le cerveau en développement consomme 60% de l'oxygène corporel.

A ce stade, connaître l'organisation anatomique et fonctionnelle du cerveau et des réseaux de neurones est indispensable pour comprendre comment la plasticité cérébrale peut, en modifiant la

¹¹ TOMASELLO démontre et appuie la thèse selon laquelle contrairement à ce que pensent les nativistes (école de Chomsky), les compétences langagières ne sont pas des « modules » neuronaux spécifiés mais sont sous-tendues par des réseaux neuronaux appropriés à ces capacités cognitives qui émergent à neuf mois. La théorie de la sélection neuronale de EDELMAN peut en rendre compte aujourd'hui (cf. partie II).

¹² Victor savait décrypter une forme de lecture (des signes conventionnels d'écriture) mais pas une lecture suivie normale. De même il avait appris à reproduire des signes. Il savait traduire certains signes en action mais était-ce de l'écriture ?

¹³ Apprentissage recrutant des niveaux biologiquement de plus en plus élaborés, conditionnement réflexe pavlovien, skinnérien, association, imitation, imagination-création.

¹⁴ Ce qui est, à ce jour, le défi culturel éducatif de la famille mais également celui de nos sociétés.

¹⁵ Chez l'adulte l'effort musculaire mais aussi le travail intellectuel « creusent l'estomac ». Ce que l'on sait maintenant mesurer et quantifier.

connectivité des réseaux, permettre à l'enfant de développer des circuits spécifiques au langage alors que ceux-ci ne sont pas spécifiés à la naissance (réseaux innés d'abord aléatoires et non définis).

II. Les bases biologiques élémentaires du fonctionnement cérébral

II.1. Le cerveau, outil d'adaptation à l'environnement

Le cerveau s'adapte en permanence à la variabilité de l'environnement. Cette capacité découle de son organisation anatomique et fonctionnelle, héritage adaptatif d'une longue histoire évolutive laquelle au gré des mutations, sélections, conservations, a produit un outil **capable** lors de son développement postnatal notamment, **de s'automodeler** sur l'environnement et le réel qu'il rencontre, puis de se ré-informer en permanence au fur et à mesure des expériences acquises (les « référentiels » de chacun sont des circuits préférentiels individuellement acquis).

Ces expériences acquises colorent nos pensées, nos créations conceptuelles et notre conscience, lesquelles signent notre humanité.

Elles ne peuvent se manifester sans le support fonctionnel que sont les réseaux de neurones comme les lésions cliniques l'attestent et contrairement à ce qu'imaginaient ARISTOTE et DESCARTES qui plaçaient la « raison » par sa rigueur **logique** au-dessus des « passions » (émotions) sensées nous égarer de la vérité. Les pensées comme les émotions ne sont pas des entités sans support matériel.

II.1.1. Généralités

Notre cerveau gère tous les savoirs instinctifs et innés qui constituent notre mémoire d'espèce. Ces savoirs sont le résultat d'une accumulation biologiquement intégrée de **savoirs adaptatifs**. Savoirs adaptés aux conditions de vie qu'avaient rencontrées nos générations d'ancêtres (temps géologique). Les savoirs progressivement assimilés par les structures neurales de notre espèce sont ceux qui étaient importants, au temps t concerné, pour la survie ou la reproduction de ces ancêtres selon la théorie de l'évolution de DARWIN.

Rappelons que nous possédons 98,6% de gènes en commun avec les chimpanzés et que c'est au niveau cortical (néo-cortex) que s'exprime la grande différence [CHAPOUTIER, 2003].

En ce qui nous concerne, pour survivre nous devons établir 90 à 95% des connexions synaptiques efficaces de notre **néocortex** après la naissance car pour être « réel-lement » fonctionnel notre cerveau immature à la naissance doit acquérir des données complémentaires (non innées) sur son environnement vital réel.

II.1.2. Le cerveau contrôle tout

Le système nerveux central (SNC) reçoit deux types d'informations :

- Des informations en provenance du **milieu extérieur** fournies par nos « cinq » sens.
- Des informations issues du **milieu intérieur** (proprioception, entéroception, imagerie mentale),

Ajoutons que les émotions et les états somatiques sont aussi des perceptions et doivent être à ce titre prises en compte par le SNC [DAMASIO, 1994].

Les sous-systèmes responsables du contrôle de ces fonctions sont topographiquement bien repérés dans l'organisme.

Toutes ces données sont traitées et intégrées par les centres nerveux (**substance grise** du cortex, de la moelle épinière et des noyaux gris dispersés dans la substance blanche).

On trouve une présentation très didactique dans GANDOLFO (2004), des fonctions générales du cerveau, qui montre la place occupée par les différents systèmes. L'organisation hiérarchique s'est mise en place au cours de l'histoire évolutive des vertébrés de telle sorte que puisse se réaliser l'intégration globale de toutes les données métaboliques et physiologiques nécessaires à la survie. (survie physiologique, psycho-sociale et même spirituelle).

Nous extrayons de cet article de GANDOLFO un aperçu de l'imbrication et de l'interconnexion d'un ensemble de fonctions régulatrices.

GANDOLFO précise les six groupes de fonctions remplies par le cerveau.

- Le cerveau est le **centre régulateur du système de communication endocrine** (molécules messagères hormonales transportées à distance par le réseau sanguin).
- Le cerveau est le **centre modulateur de notre système immunitaire** (reconnaissance du soi et du non-soi), maintien de notre intégrité interne biochimique et biologique, réactions défensives face aux bactéries et aux microbes par phagocytose et sécrétion d'anticorps spécifiques de l'agresseur (antigène).
- Le cerveau est le **centre de régulation des rythmes biologiques**.
- Le cerveau est l'**organe de la vie affective et émotionnelle**, comme l'apprentissage du langage nous l'a fait pressentir. Les émotions sont une des modalités de la communication (information pour soi et en direction des autres).
- Le cerveau est le **centre de la communication relationnelle** : il régit nos relations sociales, via nos comportements, via les informations fournies par nos sens et notre capacité à percevoir les émotions, les nôtres et celles des autres.
- Le cerveau est le **centre de la vie psychique** (mentale et spirituelle). L'activité cérébrale intéresse toutes les fonctions intellectuelles, depuis la perception, la mémoire, la planification, la prise de décision, les commandes motrices, la conscience etc. Ce sont des aspects qui nous sont très familiers mais dont le soubassement biologique global reste ignoré de la plupart d'entre nous.

Note

A la base de ce système centralisé on trouve les fonctions primaires de survie appelées aussi fonctions végétatives qui sont « chapeautées » par trois **systèmes généraux de contrôle d'information** et de **régulation** des fonctions vitales : le système endocrinien, le système nerveux, et d'autre part le système immunitaire qui permet le maintien de l'intégrité spécifique et individuelle.

Le système endocrinien contrôle les fonctions biologiques par voie chimique lente (minutes, heures, jours) via les hormones (messagers chimiques véhiculés par voie sanguine). De nombreux autres « médiateurs chimiques » non hormonaux interviennent également dans la communication cellulaire. Nous en reparlerons avec la communication synaptique (neuro-médiateurs et contrôle environnemental des neurones par la névroglie).

Le système nerveux contrôle les fonctions de relation entre organes par voie rapide (m/s). Les voies « physiques » de communication sont représentées par les fibres des neurones. Les fibres regroupées en faisceaux forment les nerfs ; les messages nerveux sont des signaux « électriques » codés en fréquence.

Le système immunitaire contrôle l'intégrité du soi selon deux voies complémentaires et coopératives. Une voie cellulaire (cellules immunitaires fixées ou circulantes) et une voie moléculaire.

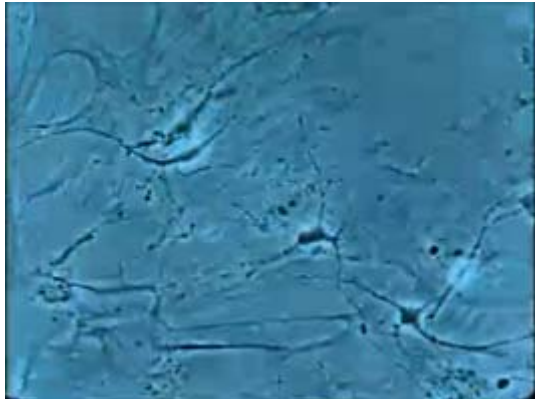
II.2. Organisation anatomique et fonctionnelle du cerveau, le tissu nerveux

II.2.1. Le neurone et ses synapses

« *Le neurone est l'unité structurale et fonctionnelle du système nerveux* ». Cette cellule est spécialisée dans le traitement de l'information. Sa forme générale est imposée par sa fonction.

Un neurone est constitué par un corps cellulaire (noyau et cytoplasme), des expansions, les dendrites et un unique axone. Les dendrites constituent les voies d'entrées des informations qui seront traitées par le corps cellulaire et sa machinerie biochimique. L'axone, long prolongement unique mais ramifié au niveau de l'arborisation terminale, véhicule le message global de sortie. La communication entre les neurones se fait par des jonctions discontinues appelées *synapses*. On estime à ½ milliard le nombre de synapses dans 1 mm³ de substance grise du cortex.

Il faut désormais noter le rôle des cellules de la névroglie, le tissu de soutien des neurones. Certaines cellules de la « glie » constituent le système immunitaire cérébral, d'autres cellules, les astrocytes, plus nombreux que les neurones, constituent une nouvelle entité fonctionnelle de régulation. Ces cellules nerveuses forment autour des synapses des neurones un manchon continu qui délimite un nouveau compartiment intérieur, dans lequel un environnement biochimique contrôlé module l'information nerveuse circulante.



Cette image est extraite de la vidéo
Le temps des neurones

de MARCEL POUCHELET, WILLIAM ROSTÈNE &
JEAN-FRANÇOIS TERNAY (1998)

Quinze minutes de plongée dans le monde
étrange et fascinant de nos cellules nerveuses.

[http://www.canal-
u.education.fr/canalu/index.php?video=32](http://www.canal-education.fr/canalu/index.php?video=32)

L'ensemble des neurones forme le « tissu nerveux », qui a la propriété d'être excitable et conducteur, [NELSON, 2003]. – Pour les biologistes un tissu est une population de cellules ayant même structure et même fonction –.

Un consensus existe autour du nombre de 100 milliards de neurones (10^{11}). Un neurone peut être connecté à 1 et jusqu'à 10 000 autres neurones, soit une combinatoire possible de 10^{15} connexions. Mis bout à bout, les câbles axoniques formeraient un circuit neuronal dont la longueur avoisinerait plusieurs centaines de kilomètres, on utilise souvent l'image d'autoroutes de l'information.

Au cours des neuf mois de la grossesse¹⁶, la mise en place des 100 milliards de neurones s'effectue à un rythme de 4000 créations par seconde, rythme moyen qui, à certaines phases, dépasse 10 000 créations par seconde [JACQUARD, 1996]. Le patrimoine génétique ne peut en définir que les grandes lignes - le contrôle rigoureux des structures réalisées ne serait pas possible -. Ce sont les facteurs environnementaux et la **sélection neuronale** qui en modèleront l'organisation adaptée (épigénie¹⁷).

Il existe deux types de synapses : les synapses de nature électrique, peu nombreuses, et les synapses chimiques de loin les plus nombreuses. Pour ces dernières la transmission du message au niveau synaptique est finement modulée par la dynamique et « l'interactivité » de multiples acteurs biochimiques.

II.2.2. Nature et propagation du message nerveux

Le message nerveux qui circule de neurone en neurone est une manifestation de « type électrique » mais il est généré en fait par des **courants ioniques**, sa vitesse est de l'ordre de 1m à 120m/sec selon les fibres nerveuses.

Cette vitesse s'explique par le fait que ce sont des **migrations d'ions**, (et non d'électrons) qui interviennent : le message nerveux est de nature électrochimique. Le passage contrôlé des ions se fait à travers des « canaux ioniques » spécifiques de chaque ion. Ces canaux sont des protéines¹⁸, ils sont enchâssés dans la membrane du neurone.

La structure et la (ou les) fonction (s) de ces protéines sont prescrites (codées) par les gènes.

¹⁶ Voir la morphogénèse du système nerveux sur le site
<http://www.embryology.ch/francais/vcns/defgener01.html>.

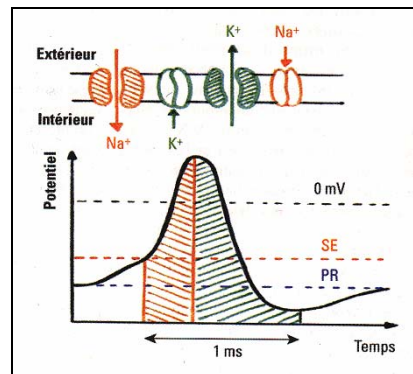
¹⁷ L'épigénie est « ce qui vient par dessus le génome ». L'épigénie définit les modifications de l'expression des gènes (gènes « allumés ou éteints ») mais ne s'accompagnant pas de changements des séquences ADN.

¹⁸ Les protéines sont constituées par une séquence linéaire d'acides aminés, elles sont codées génétiquement par les gènes qui en dirigent l'expression (synthèse des protéines).

Potentiel de repos et potentiel d'action

L'ensemble des cellules vivantes possède ce que l'on appelle un **potentiel de repos** qui correspond à l'existence d'une différence de potentiel, entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule. La différence de potentiel varie selon les types cellulaires entre -40mV à -150mV, l'intérieur de la cellule est négatif par rapport au milieu extérieur du neurone qui lui, est positif (inégalité de répartition des catégories ioniques maintenue activement).

Cette différence de potentiel est maintenue « activement » **du vivant** de la cellule. Activement signifie que cette activité est consommatrice d'énergie métabolique (ATP¹⁹), cette activité disparaît donc avec la mort de la cellule – par disparition de la source d'énergie qui est **d'origine métabolique** –.



Graphique : Variation de Potentiel au niveau de la membrane du neurone

SE : Seuil d'excitation, PR : Période de Repos

© Découverte, Revue du Palais de la Découverte, n°282, Novembre 2000.

L'arrivée d'un signal (électrique ou biochimique) capable de modifier la perméabilité de la membrane à certains ions pourra induire un nouveau message nerveux **si** les ions qui traversent cette membrane génèrent une dépolarisation. Cette **dépolarisation** est appelée **potentiel d'action**, c'est le message nerveux proprement dit.

Si au contraire c'est une hyperpolarisation de la membrane qui se produit il n'y aura pas de message nerveux généré, on dit qu'il y a inhibition (la synapse est inhibitrice).

On ne détaillera pas davantage si ce n'est pour s'attarder sur les phénomènes biochimiques multiples qui se produisent au niveau des synapses car c'est à ce niveau que se réalise l'intégration des signaux nerveux et que se réorganisent les « carrefours » des voies nerveuses et donc de l'information circulante. Cette réorganisation structurelle est également fonctionnelle par modulation.

II.2.3. Les synapses chimiques et leurs fonctions

Synapse chimique, comment agit un neuromédiateur?

[Les pointillés dans le paragraphe ci-dessous indiquent l'existence d'étapes intermédiaires qu'il ne semble pas utile de détailler ici].

Un message nerveux-signal arrivant en amont de la synapse « chimique » d'un neurone pré-synaptique dont la terminaison distale contient des vésicules remplies d'un médiateur chimique, va provoquer, ..., la libération du contenu des vésicules, ..., dans l'espace inter synaptique (fente).

¹⁹ ATP = Adénosine TriPhosphate, et ADP = Adénosine DiPhosphate. La substance énergétique ATP donne ADP+P+ **énergie**. C'est cette énergie libérée qui est directement utilisable par la cellule. L'ATP est la monnaie énergétique de toutes les cellules vivantes, elle est synthétisée lors des réactions biologiques d'oxydo-réduction, notamment la respiration. Chez les végétaux s'y ajoute la photosynthèse.

Le médiateur libéré va se fixer sur le ou les récepteurs²⁰, ..., qui lui sont spécifiques (spécificité de conformation spatiale) et qui sont fichés dans la membrane du neurone postsynaptique. Ce qui déclenche en aval, ..., sur la membrane postsynaptique soit une action électrique rapide, (dépolariation = nouveau message nerveux) soit une action plus lente car faisant intervenir une chaîne de réactions enzymatiques (actions métaboliques)²¹.

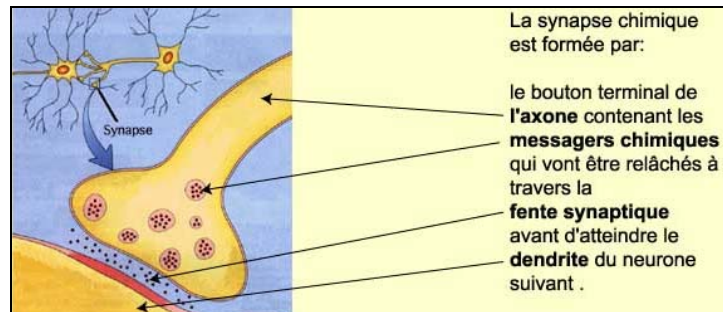


Schéma d'une synapse chimique
 Source: extrait du site « Le cerveau à tous les niveaux »
<http://www.lecerveau.mcgill.ca>

Plusieurs centaines voire 10^5 messages différents peuvent parvenir, simultanément ou décalés dans le temps²², sur un même neurone. Il existe donc une grande possibilité de modulation du message global de sortie. D'autant que, au niveau de la synapse différents types d'agents peuvent agir sur chacune des étapes biochimiques. On peut ainsi approcher le gigantisme de la combinatoire possible. Il faut de plus y superposer un niveau supplémentaire de régulation assuré par les astrocytes de la névroglie.

Selon ASCHER (2002), on connaît une quarantaine de **types de neurotransmetteurs ou médiateurs chimiques** dont les plus généralistes sont l'acétylcholine, la nor-adrénaline, la dopamine (activateur central connu à différents titres, motivation, interaction avec de nombreuses drogues, parkinson), le glutamate (neurotransmetteur excitateur majeur associé à l'apprentissage et la mémoire et connu des étudiants), la sérotonine (dépression), les endorphines (connues des accros du sport) etc.

On connaît plusieurs centaines de **protéines canaux** que l'on sait cloner : canaux Na^{++} , Ca^{++} , K^+ , Cl^- , qui sont des **électrorécepteurs**, et de **protéines récepteurs**, qui sont des **chémorecepteurs**. On connaît, également au moins quinze récepteurs différents pour la sérotonine et plusieurs types de protéines transport²³.

Rôle des synapses

Les synapses chimiques remplissent plusieurs rôles : des fonctions de valve (sens du message), d'amplificateur, de modulateur d'action et d'efficacité par les neurotransmetteurs. Les neurotransmetteurs peuvent provoquer soit une dépolariation de la membrane, ils sont alors excitateurs (comme le glutamate), soit une hyperpolarisation, ils sont alors inhibiteurs de la transmission du message nerveux (comme le GABA).

Il faut aussi signaler qu'après action, le neurotransmetteur libéré dans l'espace synaptique est recapturé par une protéine-transport pour être recyclé. De nombreuses drogues (cannabis, cocaïne, amphétamines, héroïne, et leurs dérivés) agissent au niveau de cette recapture. Si la recapture est inhibée l'effet du neuromédiateur est prolongé : c'est, cet effet qui est recherché.

²⁰ On distingue trois grands types de récepteurs membranaires, **ionotropiques** (ouvrent un canal ionique particulier, à Na^+ , à K^+ , Ca^{++} , etc.), **métabotropiques** (activation de messagers métaboliques, enzyme) ou **transporteurs** de médiateur.

²¹ Ces chaînes de réactions sont la cible privilégiée de la recherche et des développements pharmaceutiques.

²² Les neuro-biologistes parlent de configuration temporelle.

²³ Revue Science & Vie (2000), « Des messagers polyvalents », mars 2000, n° 210, 83-93.

II.2.4. Le neurone fonctionne comme un microprocesseur biologique

Du fait des modulations biochimiques du message nerveux au niveau de chaque synapse, le neurone postsynaptique se trouve soumis à une combinaison de signaux d'entrée issus des axones et des dendrites présynaptiques qui lui sont connectés. Certaines connections sont excitatrices, d'autres inhibitrices.

Le neurone postsynaptique réalise l'intégration pondérée de l'ensemble des informations qu'il reçoit pour produire un nouveau potentiel d'action (message nerveux) vers d'autres neurones postsynaptiques. Le neurone présynaptique produit « en sortie » un signal qui va activer en parallèle de nombreux autres neurones qui à leur tour constituent des systèmes de traitement (signaux en addition, en soustraction).

Ce traitement en parallèle est une des raisons de l'efficacité incomparable du traitement humain de l'information.

C'est ce fonctionnement qui est mimé (sans la modulation fine et plastique permise par l'action biochimique) dans les réseaux de neurones artificiels (voir le site de FRÖHLICH JOCHEN), et qui a amené les chercheurs en intelligence artificielle, et principalement les informaticiens statisticiens, à développer des algorithmes de calculs à base de réseaux de neurones, [voir le site de M. COTTRELL].

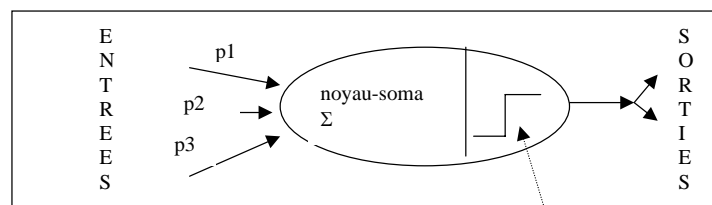


Schéma d'un neurone artificiel montrant les entrées pondérées, la fonction de sommation et la fonction d'activation, qui conduisent aux sorties.

Chaque **neurone** est un automate très simple qui reçoit des impulsions de ses voisins, et qui transmet lui-même une impulsion selon que la somme pondérée des entrées (poids signés avec un signe >0 pour une jonction excitatrice et un signe <0 pour une jonction inhibitrice) est supérieure à un certain seuil d'excitation (fonction d'activation).

Les réseaux de neurones vont du réseau simple (deux neurones, un sensitif, un moteur pour un réflexe simple) aux réseaux les plus complexes (des milliers de neurones pour un seul réseau). Répétons-le, la communication entre neurones peut revêtir une variété quasi illimitée de combinaisons spécifiques.

II.2.5. Comment s'établissent les réseaux de neurones

Notre cerveau est l'objet d'une trame programmée génétiquement (30 000 gènes dont un tiers affecté au cerveau). Au cours de la gestation, les neurones se développent en un quadrillage prolifique et aléatoire selon une séquence identique -car spécifiée génétiquement- mais déjà régulée par l'environnement interne local (embryogenèse et phénomènes d'induction).

Au cours du développement postnatal, on constate : une réorganisation par **élagage**²⁴ de certaines connexions, un renforcement ou un affaiblissement de certaines autres en réponse à des stimulations issues de l'environnement (épigénie), voire même des créations (épines dendritiques et dédoublement de synapses observables désormais par imagerie cérébrale).

²⁴ Selon le modèle de la TSGN proposé par EDELMAN, Théorie de la Sélection des Groupes de Neurones qui repose sur trois piliers. 1) la *sélection développementale*, 2) la *sélection expérimentale*, toutes deux opérant sur des répertoires de variantes neurales et 3) la *réentrée* : processus clé de réinformation dynamique assurant ainsi la corrélation spatio-temporelle des processus neurales actifs...

Les nouvelles connexions créent des circuits privilégiés pour la circulation de l'information. Cette plasticité²⁵ permet à nos circuits cérébraux, notamment ceux du néocortex de s'organiser d'une façon qui correspond et s'adapte au monde dans lequel chaque individu vit et se développe.

II.2.6. Des réseaux innés non spécifiques aux réseaux spécifiés par l'expérience

Dans les années 1960, HUBEL & WIESEL (NOBEL1981) démontrèrent pour la première fois, avec le système sensoriel visuel, le rôle crucial des stimulations externes dans la construction du cerveau (épigénie) en relation avec le système perceptif visuel. On sait depuis que le développement précoce des fonctions sensorielles passe par des périodes critiques durant lesquelles l'expérience au contact environnemental peut avoir un impact sur le développement des réseaux impliqués et donc sur la dynamique ultérieure des réseaux concernés.

Pour certaines fonctions il existe une **fenêtre temporelle** propice à la mise en route fonctionnelle de réseaux. Ainsi des réseaux non spécifiques, le deviennent après stimulations, ce que l'on a déjà pressenti avec le cas des enfants sauvages concernant le développement du langage (absence des stimuli adéquats que sont les interactions sociales par exemple).

II.2.7. Gènes et connexions neuronales

Notre patrimoine génétique commun est de 30 000 gènes qui seront « traduits » en des milliers de protéines différentes²⁶. Le mécanisme de **formation des synapses** dépend de la maturation du système nerveux central, mais l'élimination et l'élagage dépendent de l'expérience comme nous allons le montrer avec l'apprentissage.

Les signaux issus de l'environnement agiront sur les gènes par l'intermédiaire d'interrupteurs qui sont des facteurs de transcription [FIELDS 2005]. Avant d'appréhender les différentes formes de mémoires et les apprentissages chez l'homme, faisons un détour par un petit mollusque invertébré, fruste mais pourtant capable de mémoriser une expérience rencontrée : l'aplysie.

III. Apprentissages, mémorisations.

III.1. L'apprentissage simple par conditionnement chez un mollusque (invertébré)

Voici un exemple étudié chez l'**aplysie** ou limace de mer.

Cette expérience simple de conditionnement permet de comprendre :

- que l'architecture fonctionnelle des réseaux neuronaux se modifie avec l'expérience et dépend de la plasticité synaptique,
- que cette plasticité participe activement à une forme - très simple ici - de mémorisation [BLANC, 1999].

Expérience 1 : illustre la boucle perception-action

L'aplysie lorsqu'elle n'est pas dérangée déploie son siphon pour aspirer l'eau de mer et respirer en faisant circuler l'eau et l'oxygène qui s'y trouve dissous, sur ses branchies. Au moindre contact le siphon se rétracte.

²⁵ Plasticité cérébrale : capacité des synapses (ou des cellules en phase de croissance) à pouvoir choisir entre différentes trajectoires ou connexions. C'est une propriété essentielle du tissu nerveux.

²⁶ Car le gène de l'ADN transcrit (copié) en ARN subira des modifications (coupures, élimination et réarrangements des éléments conservés entre eux) ; celles-ci donneront de nouvelles combinaisons qui seront traduites en autant de protéines différentes. Ainsi l'université de Cambridge a découvert que dans le cerveau le gène Dscam, est transcrit en 38016 brins d'ARN différents et donc de protéines potentiellement différentes. Ces protéines Dscam sont des protéines d'accrochage entre neurones. Une protéine étant spécifique, chaque neurone a sa propre façon de « s'accrocher aux autres » ce qui assure la formation de territoires cérébraux organisés et distincts, cf. Revue Cerveau & Psycho (2004), « Signature de neurone », n°5, mai 2004, p. 9.

C'est une réaction réflexe dont le support nerveux est très simple.

Dans la **boucle perception-action** le neurone sensoriel tactile (en bleu) envoie les messages nerveux au centre ganglionnaire (marron) duquel repart directement le neurone moteur (rouge) qui innerve les muscles de rétraction du siphon.

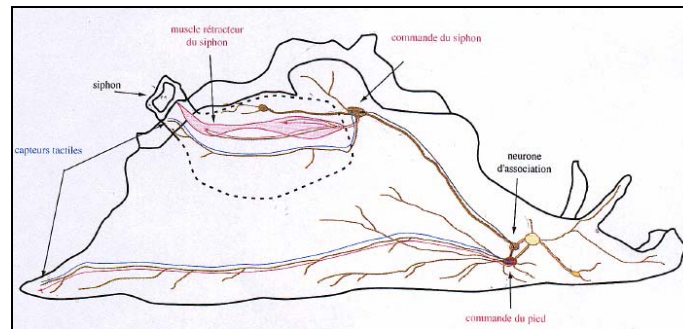


Schéma du système nerveux de l'Aplysie C MNHN

Source : A. BLANC, (1999), « Des mondes de réflexes » *Revue de l'APBG, Biologie-Géologie*, n°3, 1999, pp 542 © Muséum national d'histoire naturelle.

Expérience 2 : illustre le réflexe de conditionnement et la modification de la configuration synaptique

Un contact délicat ne provoque pas le retrait du siphon mais on l'associe à un choc électrique sur la queue de l'animal.

Après plusieurs essais le simple effleurement du siphon déclenche cette fois la rétraction du siphon mais également la rétraction du « pied » de l'animal.

L'analyse de l'organisation anatomique montre que lors de l'expérience il y a eu réorganisation anatomique du réseau neuronal et de là, sa modification **fonctionnelle**. Des contacts synaptiques nouveaux « se sont créés » entre le réseau perception-action du siphon et le réseau perception-action du pied.

Une liaison fonctionnelle s'est établie par l'intermédiaire du neurone d'association reliant le ganglion de commande du siphon et le ganglion de commande du pied. Une analyse électro-physiologique objective les nouvelles synapses mises en place.

Conclusion

Un balbutiement de « mémoire » s'est produit chez l'aplysie ; il a pour support une modification de l'architecture fonctionnelle entre les synapses de neurones (ici cinq neurones seulement)

On sait également, comme le physiologiste DONALD HEBB²⁷ l'avait proposé dès 1940, que lorsque deux neurones en réseaux déchargent en même temps ils peuvent se connecter, via des synapses. C'est la co-relation temporelle de fonctionnement entre les deux neurones qui le permet.

Le monde de l'aplysie est un **monde réflexe et stéréotypé mais il est capable d'apprentissages**. Cet « apprentissage » est réversible et disparaît s'il n'y a pas renforcement par la répétition.

III.2. Les mémoires et les apprentissages chez l'homme

Nous naissons avec un câblage primitif, inné, qui assure notre survie physiologique (besoins primaires) et sous-tend également notre survie en terme d'animal social (Ethologie humaine).

²⁷ En 1949, D. HEBB a énoncé une règle de modification empirique des connexions synaptiques.

« When an axon of cell A is near enough to excite cell B and repeatedly or persistently takes part in firing it, some growth process or metabolic changes takes place in one or both cells such that A's efficiency, as one of the cells firing B, is increase ».

Ce type de câblage est regroupé dans nos circuits ancestraux **cerveau-reptilien** (automatismes, réflexes) et **cerveau-mammalien-limbique** (émotionnel).

Cependant l'homme est un animal adaptable dont la survie ne peut uniquement reposer sur des séquences comportementales spontanées, invariables et codifiées. Il vit dans un environnement changeant. La solution évolutive qui s'est dessinée, au fur et à mesure que le cerveau s'est complexifié, a été de rendre sa formation plus plastique, autrement dit de faire modeler le cerveau par l'environnement dans lequel il devra fonctionner [BOWND, 2001].

Ainsi l'adaptation de l'homme à son environnement se fait spontanément à l'échelle d'une vie plutôt qu'en plusieurs générations comme le voudrait la sélection parmi les gènes présents. Les phénomènes d'apprentissage (processus secondaires) sont une illustration de cette plasticité cérébrale. Certains réseaux neuronaux se configurent ou re-configurent en fonction de l'expérience individuelle, du monde réel rencontré, mais aussi du monde créé mentalement, ce qui n'est pas intuitif.

III.2.1. Une classification des mémoires

La mémoire est la fonction qui permet de conserver et de restituer des informations acquises selon la séquence ci-dessous [HERVÉ-MINVIELLE, 2000].

Acquisition-Codage ↔ Consolidation ↔ Stockage ↔ Récupération ↔ Rappel

Toutes ces étapes s'enchaînent de manière séquentielle mais avec des boucles de rétroactions et donc de ré-information.

Les cas cliniques de perte de fonction (s) et l'imagerie médicale fonctionnelle ont montré que la mémoire est un **processus actif** qui nécessite des sous-unités fonctionnelles²⁸, qui sont elles-mêmes des systèmes actifs en constante ré-information par des voies nerveuses réciproques.

De fait ce n'est pas une mémoire qui intervient dans le processus de mémorisation mais différents types de mémoires. Pour clarifier, les chercheurs ont proposé plusieurs classifications, reposant sur différents critères. Nous retenons ici, une classification courante qui s'articule autour de la mémoire à court terme, la mémoire de travail, la mémoire à long terme (mémoires procédurale et déclarative), et la mémoire spatiale.

- La mémoire à court terme est une mémoire rapide, provisoire, de capacité limitée, décomposable en mémoires sensorielles, **iconique** (visuelle) et **échoïque** (auditive) très rapide et une mémoire **lexicale** qui permet de retenir sur une courte période un nombre limité d'items (mots, sons, chiffres etc.). Dans des conditions normales, l'individu moyen peut retenir et travailler mentalement sur sept items, par contre si l'individu adulte est perturbé (stress) ou sous l'emprise d'une forte émotion, l'empan de la mémoire se réduit (trois items). Dans ces conditions de stress, cet empan peut être réduit à néant chez l'enfant, « plus rien ne rentre » !
- La mémoire de travail également limitée (maintien temporaire des souvenirs et de l'information pendant la réalisation d'une série de tâches cognitives) est liée aux éléments du contexte (entrées dont le sujet n'est pas conscient). Cette mémoire n'est pas sauvegardée, son contenu ne passe pas en mémoire à long terme²⁹.
- La mémoire à long terme est une mémoire de grande capacité (canaux d'accès multiples) qui regroupe la mémoire **procédurale** (ou **implicite** car **inconsciente**) et la mémoire **déclarative** (ou **explicite**) accessible à la conscience.
 - La mémoire procédurale correspond à tous les « *savoir faire* » qui relèvent d'actes moteurs et qui sont passés en mode automatique inconscient. Ces automatismes sont

²⁸ On n'utilisera pas à dessein le terme « module » qui évoque pour nous une **rigidité structurelle** qui prête à l'amalgame trop courant « structure= génétiquement spécifié ».

²⁹ Certains chercheurs assimilent la mémoire de travail à la mémoire à court terme.

économiques en énergie psychique et donc métabolique (par exemples, faire du vélo, conduire une voiture ...).

- La mémoire déclarative correspond aux connaissances apprises « *savoir que* ». Elle regroupe la mémoire **épisode** qui porte sur les faits ou événements du passé vécu (mémoire autobiographique, exemple : le premier voyage en avion), et la mémoire **sémantique** qui correspond aux acquis culturels signification des mots, des symboles culturels, etc. (exemple : Rome est la capitale de l'Italie). Ces deux mémoires bien que différentes sont intimement reliées.

- La mémoire spatiale, permet de s'orienter et de se repérer dans l'espace.

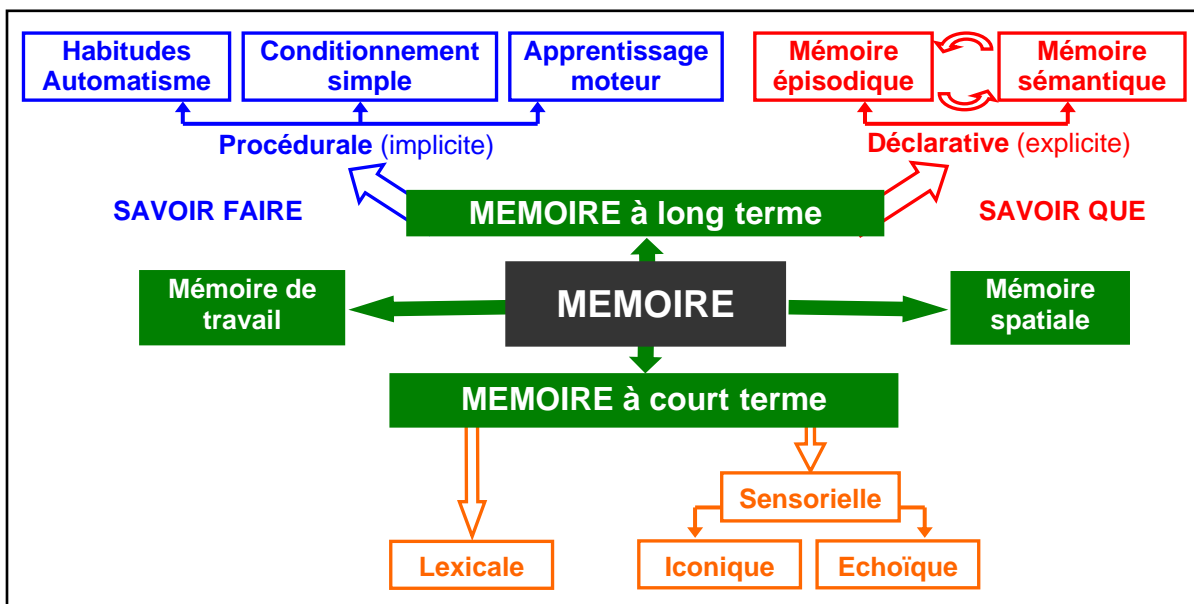


Schéma des différents types de mémoire, inspiré de HERVÉ-MINVIELLE A. (2000)

III.2.2. Le Codage de l'information

Nous avons tous expérimenté la multiplicité du codage d'un mot par exemple, sans en avoir forcément analysé les mécanismes sous jacents conscients ou inconscients. Ainsi par exemple : vous recherchez un mot, vous « l'avez au bout de la langue », vous ne parvenez pas à « l'afficher » dans sa globalité et pourtant :

1. Vous « savez » qu'il est formé de 3 syllabes !
2. Qu'il contient un e et un i...
3. Alors un nouveau « flash d'information-mémoire » vous donne accès à un nouvel indice : le mot « **Steiner** ». Pourquoi Steiner?
4. Il vous semble que le mot qui vous échappe peut lui être apparié. Pourquoi ?
5. Et là seulement le souvenir recherché surgit enfin, le mot que vous cherchiez est « **DODERLEIN** »
6. Vous avez du même coup la réponse à vos deux « pourquoi » ?

Cet exemple vécu, réel, illustre bien le fait qu'un mot peut être encodé sous différents attributs (codes) s'appuyant sur des substrats neuronaux eux mêmes potentiellement connectés et peut-être même hiérarchisés entre eux selon des stratégies soit universelles (capacités innées) soit individuelles (stratégies mnémotechniques acquises).

Montrons par un autre exemple courant la pluralité des représentations. Le sujet va dans la salle de bains prendre un peigne pour se recoiffer. En arrivant il ne se souvient plus, consciemment de ce qu'il vient chercher. Son bras fait machinalement le geste de se peigner, ce qui lui remet en mémoire

active, qu'il est venu chercher, un peigne. La mémoire verbale était défaillante mais la mémoire gestuelle inconsciente et latente était restée activée.

L'encodage **personnel** peut être très complexe. L'encodage vise à donner un sens et un poids à l'information en la traitant sous de multiples aspects ou caractéristiques. Les processus de traitement sont parfois conscients parfois inconscients. L'efficacité de la récupération dépendra de la multiplicité et de la profondeur de l'encodage (modalités, liens mentaux émotionnels, contextuels etc.).

Il est maintenant indispensable de s'intéresser aux bases biologiques qui sont le support matériel de ces informations.

III.2.3. Les aires cérébrales concernées

Cette distinction entre les différents types de mémoires repose sur des modalités fonctionnelles diverses mais aussi sur des structures neurales topographiques dispersées³⁰ et interconnectées. On ne parle plus de module car cela donne une image trop rigide et figée des configurations neuronales, considérées plutôt comme des réseaux fluides et dynamiques, comme l'a révélé l'imagerie fonctionnelle.

L'imagerie fonctionnelle montre une variabilité individuelle, avec cependant deux structures cérébrales sous-corticales bien localisées qui apparaissent indispensables à la mémorisation :

1 L'hippocampe est indispensable pour le passage de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme, ainsi que pour la mémoire contextuelle notamment la mémoire de l'environnement spatial.

Par exemple, l'hippocampe des chauffeurs de taxi est d'autant plus développé que le chauffeur de taxi est expérimenté [POTIER, BILLARD, DUTAR, 2001].

2 L'amygdale³¹ est le support de la mémoire implicite, perceptive et émotionnelle. Elle est le siège des émotions. Elle module nos réactions à des événements qui ont une grande importance pour notre survie. Avertie d'un danger imminent, c'est elle qui déclenche des réactions de peur (mains moites, palpitations).

L'amygdale et l'hippocampe font partie du système limbique qui régule les comportements émotionnels, lesquels interfèrent dans les processus de mémorisation. Ces deux structures sont interconnectées et peuvent fonctionner en parallèle. Elles peuvent être à l'origine d'une émotion déclenchée par un souvenir particulier. C'est parce qu'il existe des liens étroits existant entre l'amygdale et l'hippocampe qu'un événement traumatisant peut devenir dans le futur une source d'anxiété, lorsqu'une situation analogue se présente. Les traumatismes d'enfance, conscients ou inconscients, sont conservés dans ces circuits neuronaux. (On notera que FREUD était de formation neurologue. Il avait travaillé sur les réseaux neuronaux, son intuition s'était donc nourrie de cette formation initiale).

La mémoire explicite plus élaborée, requiert également le système limbique³²; pour renforcer ou affaiblir les informations déjà traitées au préalable par la mémoire procédurale (habitudes), contrôlée par les ganglions de la base, qui reçoivent les informations corticales primaires provenant de l'ensemble (ou presque) des voies sensorielles.

Chaque individu doit apprendre à gérer au mieux ses mémoires. BERNARD MAZOYER et NATHALIE TZOURIO-MAZOYER³³ ont observé le cerveau de RÜDIGER GAMM expert en calcul mental, lors de

³⁰ Voir le site de neuro-anatomie du neurologue Dr D. HASBOUN du CHU Pitié Salpêtrière. Ce site présente des séquences multimédias intégrant vidéos, textes et images synchronisés, « *L'Enseignement de la neuroanatomie par l'image* », <http://www.chups.jussieu.fr/ext/neuranat/>

³¹ L'amygdale, à ne pas confondre avec l'amygdale située dans la gorge, est constituée d'un ensemble de noyaux interconnectés logés en avant de l'hippocampe, dans l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche.

³² Système à dopamine : plaisir, nouveauté. Récompense-punition : noradrénaline. Evitement de la souffrance : sérotonine.

³³ BERNARD MAZOYER et NATHALIE TZOURIO-MAZOYER travaillent dans le groupe d'Imagerie Neuro-fonctionnelle (GIN) du CEA/CNRS à Caen.

calculs arithmétiques nécessitant la mise en mémoire de résultats intermédiaires. Normalement nous utilisons notre mémoire visuo-spatiale, situées dans les aires frontales de l'hémisphère gauche du cerveau. RÜDIGER GAMM, quant à lui, utilise en plus sa mémoire épisodique, une mémoire à long terme des faits marquants de la vie, située dans le lobe frontal de l'hémisphère droit. Comme beaucoup de calculateurs prodiges, il s'est élaboré une stratégie personnelle de résolution. Il s'entraîne tous les jours depuis 7 ans à raison de une à quatre heures par jour pour mémoriser des algorithmes de calculs. Ses capacités ne sont pas innées elles sont le résultat d'un apprentissage acharné. La gestion de ses mémoires lui est spécifique [Donnars O, 2002].

En Résumé :

La mémoire non déclarative que l'on trouve chez les invertébrés a été conservée chez les vertébrés supérieurs, mais s'y est ajoutée la mémoire déclarative puis, chez l'homme, la mémoire de travail, la remémoration consciente du passé et les anticipations du futur, qui requièrent l'intégrité du cortex préfrontal.

Tout souvenir est de fait un souvenir perceptif, la pensée ne peut s'affranchir du corps. Les réseaux de nouveaux souvenirs sont les prolongements des anciens, ils s'ancrent dans l'ensemble de nos perceptions individuelles et requièrent les structures neuronales qui les sous-tendent.

Si on pense à sa voiture rouge on active l'aire **visuelle** primaire.

III.2.4. Biophysique et biochimie de la mémoire

III.2.4.1 Biophysique de la plasticité cérébrale

La mémoire obéit au principe de HEBB et passe par le remodelage, la création de nouvelles synapses, ou encore le renforcement-affaiblissement d'autres synapses. Cette création de liens nouveaux configure de nouveaux réseaux. Ces nouveaux réseaux (modifications synaptiques), sous-tendent le souvenir de l'expérience.

En 2000 des chercheurs ont pu pour la première fois photographier la formation de ces liens physiques : les nouvelles synapses engendrées par l'apprentissage dans l'hippocampe d'un rat lors du déclenchement artificiel du mécanisme de mémorisation³⁴.

Cette **plasticité** synaptique permet les récupérations ou les substitutions de fonction après un accident vasculaire cérébral par exemple. Elle est sous la dépendance de la biochimie synaptique et contrôlée par les gènes affectés à la structure et aux fonctions synaptiques, eux-mêmes « allumés ou éteints » selon le contexte environnemental (épigénie).

III.2.4.2 Biochimie de la plasticité, la PLT

La stimulation répétée d'une voie nerveuse modifie le fonctionnement des synapses activées. L'efficacité de la transmission des signaux dans ces synapses augmente de façon durable et stable (l'effet persiste de 1/2h à 10h ou plusieurs semaines selon les synapses et les réseaux).

Ainsi, les neurones réagissent davantage à toute stimulation ultérieure. Cet effet est appelé *Potentialisation à Long Terme (PLT)* : la voie renforcée privilégie alors l'information qui y circule.

Les neuromédiateurs synaptiques sont les principaux agents de la reconfiguration et de la modulation synaptique (acétylcholine, nor-adrénaline, glutamate, dopamine, sérotonine, endorphines etc.).

Les différents neuromédiateurs connus pour leurs effets comportementaux, attestent ainsi de l'intervention du contexte émotionnel dans la mémorisation.

III.2.4.3 Mémoire et génétique

Dès les années 1960, les chercheurs avaient découvert que le passage des souvenirs de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme faisait intervenir les gènes neuronaux, localisés dans le noyau de la cellule, en produisant des protéines spécifiques dites « protéines de la mémoire ».

³⁴ Equipe du DR MULLER (Genève), Pour La Science, (2001), hors série « *La mémoire en photos* » avril-juillet 2001.

Le mécanisme biochimique de ce renforcement est en voie d'être explicité. On sait maintenant que ce passage se situe au niveau de l'hippocampe. Quand un souvenir à court terme se crée les synapses concernées sont sensibilisées temporairement par la stimulation (potentiel d'action). Pour que ce souvenir passe dans la mémoire à long terme c'est-à-dire pour que les connexions synaptiques soient renforcées il faut que les synapses sensibilisées envoient un signal au noyau du neurone. Selon D. FIELDS [2005], ce signal provoque la transcription puis la libération de l'ARN-messager³⁵ qui lui, peut sortir du noyau et passer dans le cytoplasme. La machinerie cellulaire cytoplasmique traduit³⁶ alors, le message codé dont il est porteur, en protéines spécifiques nécessaires au renforcement des synapses concernées par l'information circulante en cours.

Ces imbrications entre l'inné (gènes) et l'acquis (réorganisation des circuits cérébraux sous apprentissage) font dire à l'éthologue BORIS CYRULNIK : « *L'inné est déterminant à 100 %. Quant à l'acquis, il ne lui reste que 100 %* », il poursuit « *Cette pirouette permet de dire que, si vous supprimez l'un des deux, c'est l'ensemble qui meurt* ».

Le débat inné/acquis est donc aujourd'hui dépassé, l'un ne peut aller sans l'autre pour définir notre humanité.

La symbiose [nature – culture] trouve ici, au niveau cérébral, les conditions et le support de son expression.

III.2.5. Facteurs agissant sur l'apprentissage et la mémorisation

L'apprentissage et la mémoire sont des phases différentes du même mécanisme progressif et continu dont les étapes sont difficiles à distinguer. Sans mémoire, l'apprentissage est impossible, et sans apprentissage il n'y a pas de mémoire. C'est une loi biologique. La vie « fait du neuf sur du vieux », sans éliminer mais en réutilisant et en recombinaison les matériaux présents.

Par expérience les psychologues et pédagogues ont déjà relevé nombre de facteurs favorisant les séquences mnésiques : l'état physiologique et de repos, l'état émotionnel, le degré de vigilance, l'attention, la concentration, le contexte d'apprentissage (lieu, éclairage, odeurs, bruits...), la motivation pour la découverte, l'intérêt par nécessité, mais aussi les stratégies d'apprentissage (apprenant visuel-spatial, auditif, kinesthésique...), sans oublier les multiples drogues naturelles³⁷ ou synthétiques.

Notons que les souvenirs « re-mémorisés » qui s'appuient sur « l'imagerie mentale » propre à chacun, ne seront pas rappelés exactement tels qu'ils ont été engrangés, mais seront reconstruits en fonction des mémoires et des référentiels personnels que « s'est élaborés » le sujet au fur et à mesure de ses expériences et confrontations au réel. C'est toute la créativité de l'imagerie mentale.

Objectivement : **la mémoire est un témoin subjectif !**

III.3. Mémorisation et images mentales

Rappelons encore une fois, que tous les processus nerveux de la **connaissance** (perception, compréhension) et de l'**action**, comme on l'exprime en philosophie, sont supportés par une connectique neuronale diversifiée et complexe et que chaque acquis s'appuie sur les réseaux innés mais également acquis, car produits de l'**expérience vécue et intériorisée**.

Le sens commun veut bien l'admettre pour l'émotionnel Freudien (le XX^e siècle est celui de la psychanalyse), l'admettre aussi pour la mémoire (les souvenirs doivent bien être engrangés quelque part ou du moins potentiellement présents sous une certaine forme rappelable), par contre le « sens

³⁵ L'ADN situé à l'intérieur du noyau de la cellule ne peut quitter le noyau. C'est une transcription de l'ADN appelé ARN-messager qui assure le transport du code génétique du noyau vers l'extérieur.

³⁶ Les biologistes disent « l'expression » des protéines.

³⁷ Les drogues faussent le « dialogue permanent » entre les neurones. Elles modifient la **fonction**. La modification prolongée retentit sur l'équilibre naturel en modifiant la **structure** (il y a variation du nombre de récepteurs membranaires exprimés dans la membrane et donc altération du poids de l'information circulante).

commun cartésien » ne le conçoit pas pour les « pensées » qu'il présuppose encore, par *a priori* culturel, supérieures et hors corporalité [DAMASIO 2000].

Pourtant, la survie dans le domaine social et « psycho-personnel » implique chez l'homme, avant toute action ou décision, un fonctionnement mental qui prenne en compte une multitude de données et d'indices mémorisés concernant son expérience acquise (ne serait-ce que pour ne pas reproduire les mêmes erreurs) mais également la régulation de l'organisme en activité. Ces données et indices doivent donc être fondés sur un vaste répertoire d'informations relatives aussi bien au monde interne qu'au monde externe. Il doit donc exister un support biologique organisé permettant la représentation élémentaire du corps et constituant une partie de la banque de données nécessaire à l'intégration et donc au traitement cérébral de ces données.

Ce lieu (topo) primordial³⁸ de représentation du corps (soma) est bien représenté dans le cerveau : ce sont les aires somatotopiques appelées aussi aires somato-sensorielles, ou cortex fondamentaux, ou encore cortex primaires.

III.3.1. Perception et Représentations du corps, les cortex primaires et leurs images

A tout instant, l'information sensorielle (et par retour l'information motrice), s'appuie sur des représentations du corps, topographiquement repérées sur les cortex sensoriels et moteurs.

Dans les années 1950, PENFIELD & RASMUSSEN en étudiant les effets de stimulations électriques de zones intracorticales établirent chez l'homme les cartes de ces aires. Il existe deux types de cartes, les cartes de la sensibilité (cortex sensoriel) où aboutissent les terminaisons sensibles de la surface corporelle, et les cartes motrices (cortex moteur) d'où partent les messages moteurs, voir le schéma ci-dessous de « l'homoncule » moteur humain. Les surfaces relatives aux deux types de cortex, sensoriel et moteur sont sensiblement différentes.

Nous ne résistons pas à présenter aussi la carte somatotopique du rat³⁹ qui donne une « image » très représentative du mode perceptif de cet animal (voir le schéma du « Ratoncule » cérébral sensoriel ci-après).

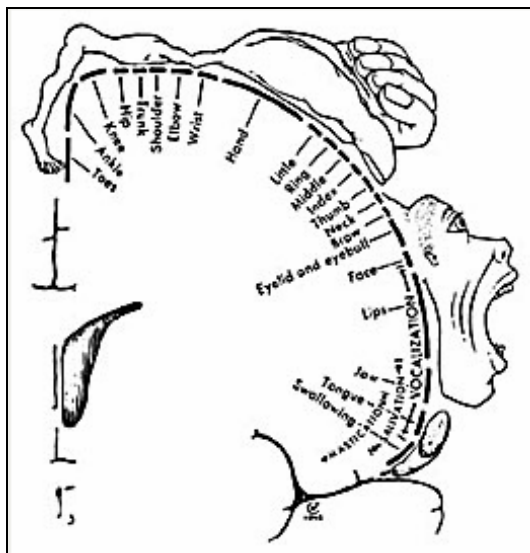


Schéma du *Motor homunculus cerebral* de PENFIELD & RASMUSSEN (1950)
(<http://www.mni.mcgill.ca/>)

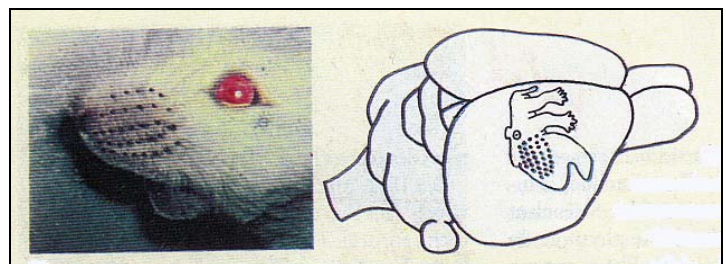


Photo des Vibrisses d'un Rat, et Schéma du « Ratoncule » cérébral sensoriel
© Sciences et Vie, n° 95, Juin 1996.

Quand on sait que le rat explore et discrimine les textures de son environnement surtout avec les vibrisses de son museau, on comprend mieux pourquoi la surface dévolue aux vibrisses dans le cortex sensoriel tactile est si développée.

³⁸ Primordial : au sens de premier et primitif.

³⁹ Le rat est très utilisé pour étudier les mécanismes d'apprentissage.

Par analogie on peut comprendre le pourquoi de l'image représentative déformée, de l'«homoncule» humain. Les surfaces relatives sur la « carte » corticale sont proportionnelles au nombre de synapses recrutées au niveau des différentes parties du corps concernées.

L'image déformée que donne ces cortex primaires sensoriel et moteur est, du vivant de l'individu, en remaniement permanent, se modifie et se déforme selon le contexte comportemental⁴⁰ ; elle est un des reflets de la plasticité cérébrale. Elle est donc aussi une forme de « mémoire corporelle ». Ces cortex se modifient sous l'effet de l'apprentissage.

Des observations de certaines aires cérébrales chez les violonistes ou chez les chauffeurs de taxi ont montré des différences importantes. Les aires cérébrales associées à la motricité de l'auriculaire gauche du violoniste sont plus étendues que celles d'un non violoniste. De plus ces aires sont d'autant plus étendues que l'apprentissage du violon a débuté plus jeune, entre 5 et 10 ans [RENAULT, 2005].

Chez les chauffeurs de taxi, des observations ont montré que les aires du cerveau qui traitent des représentations spatiales sont d'autant plus étendues qu'ils ont exercé longtemps leur métier.

III.3.2. Des images perceptives sensorielles aux images mentales

Les « images somatotopiques » ou sensorielles des cortex sensoriels constituent la banque de données primaire sur laquelle s'appuient nos représentations relatives au monde extérieur (les perceptions de nos 5 sens). L'étage supérieur de nos pensées et de nos raisonnements s'appuie sur cet étage primaire.

Avant de reprendre des justifications avancées par les scientifiques, sur la production des images mentales, voyons ce qu'ont dit par introspection et intuition certains auteurs, penseurs, philosophes, mathématiciens, ou encore auteur atypique.

ROSE (1992) cite CICERON, De oratore, II, LXXXVI, 351-4 « *Les personnes désirant soumettre cette faculté à un entraînement doivent choisir en pensée et en lieux distincts, puis former des images mentales des choses dont ils veulent se souvenir et "ranger" ces images dans les divers lieux. De cette façon, l'ordre des lieux conservera l'ordre des choses ; et les images des choses évoqueront les choses elles-mêmes... Les lieux sont les tablettes de cire sur lesquelles on écrit, et les images, les lettres qu'on y trace* ». Les anciens, philosophes et penseurs, parlaient déjà d'images mentales.

Plus près de nous, Voltaire s'interrogeant sur ses pensées dit dans le Dictionnaire philosophique : « *Qu'est ce qu'une idée ?*

C'est une image qui se peint dans mon cerveau,

Toutes vos pensées sont donc des images?

Assurément ; car les idées les plus abstraites ne sont que les suites de tous les objets que j'ai aperçus. Je ne prononce le mot d'être en général que parce que j'ai connu des êtres particuliers. Je ne prononce le nom d'infini que parce que j'ai vu des bornes, et que je recule ces bornes dans mon entendement autant que je le puis ; je n'ai des idées que parce que j'ai des images dans la tête ».

La remarque de Voltaire « *de tous les objets que j'ai aperçus* » montre qu'il avait déjà saisi ce que la biologie actuelle vérifie « tout souvenir est en réalité un souvenir perceptif ».

Les mathématiciens, EINSTEIN, HADAMARD, POINCARÉ pensaient aussi en images.

En 1908, HENRI POINCARÉ (1854-1912) membre de l'Académie française et de l'Académie des Sciences fit une célèbre conférence « L'invention Mathématique », à la Société de Psychologie de Paris. En 1944 le mathématicien français JACQUES HADAMARD⁴¹ (1865-1963) élargit cette analyse en s'intéressant aux écrits de quelques grands découvreurs et en procédant par enquête auprès de ses

⁴⁰ SHULZ D., (2000), « *Mémorisation et rappel, le poids du contexte interne* », Science & Vie Hors Série « *Les performances de la mémoire humaine* », n°212, 52-56.

⁴¹ HADAMARD fut un brillant élève, reçu 1^{er} à l'école Polytechnique, et à Normale Sup. Il sera agrégé de Mathématiques en 1897, nommé Professeur à Paris, puis Maître de conférences à Bordeaux et à la Sorbonne. Biographie de Hadamard : <http://www.bibmath.net/bios/index.php3?action=affiche&quoi=hadamard>
En 1943-1944 en poste à l'Université de Princeton il réalisa une enquête auprès de ses confrères mathématiciens américains. Cette enquête portait sur leurs découvertes en Mathématique.

confrères mathématiciens américains. Son livre : « *Psychologie de l'invention dans le domaine mathématique* » insiste sur l'importance des images mentales dans les étapes de découvertes et de créations. Nous le citons : « *Ayant interrogé quelques chimistes, ils déclarent tous avoir des pensées absolument sans mots, avec l'aide d'images mentales* ».

EINSTEIN en réponse à l'enquête de HADAMARD dit « *Les mots et le langage, écrits ou parlés, ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de ma pensée. Les entités psychiques qui servent d'éléments à la pensée sont certains signes ou des images plus ou moins claires, qui peuvent « à volonté » être reproduits ou recombinaés* ».... Einstein précise que ses images sont visuelles ou motrices.

L'analyse de HADAMARD est une analyse très fine et étayée des processus de création, ses remarques personnelles et celles qu'il rapporte sont en concordance avec les récentes connaissances sur le fonctionnement cérébral. Nous étudierons les analyses de POINCARÉ et HADAMARD et d'autres mathématiciens dans un prochain rapport de recherches.

Si les mathématiciens font tous référence à la logique pour démontrer des théorèmes, la très grande majorité des mathématiciens, font également mention de leurs pensées créatives en faisant mention d'images mentales [LE GUEN 1999-1].

Certains calculateurs prodiges voient les nombres en images. Leur mémoire des nombres, le stockage des calculs intermédiaires lors d'une opération (addition, soustraction, multiplication, division), et les relations entre nombres, s'appuient sur une imagerie qui leur est personnelle.

Citons un autre exemple plus contemporain. TEMPLE GRANDIN [1997] auteur de « *Penser en Images* » (1997), perçoit et pense en images, toutes ses perceptions sensorielles sont traduites consciemment également en images. T. GRANDIN enseigne à l'Université de Colorado. Autiste, elle est pourtant spécialiste en conception de matériels destinés aux animaux. Elle est un cas extrême mais non unique montrant les capacités mentales dont certains individus disposent, à savoir utiliser la pensée visuelle comme mode principal de traitement d'informations. Elle débute son livre par « *Je pense en images. Pour moi, les mots sont une seconde langue. Je traduis tous les mots, dits ou écrits, en films colorés et sonorisés* ».

Elle ne stocke dans sa mémoire que des images et se constitue ainsi une bibliothèque d'images, car c'est la seule stratégie de traitement des informations efficace pour elle. Elle peut assembler, agencer des images élémentaires puis les faire tourner pour les voir sous tous les angles, comme le font les logiciels graphiques actuels qui visualisent des images en 3D. Enfant elle croyait que « tout le monde pensait en images », adulte elle a du mal à comprendre pourquoi les ingénieurs ont besoin de faire des plans.

Pour T. GRANDIN les concepts et les symboles abstraits n'ont aucun sens. Ainsi le mot « paix » ou le mot « justice » ne signifient rien pour elle. Pour appréhender les mots abstraits, elle doit utiliser des symboles-images comme une colombe pour la paix, et une balance pour la justice. Pour elle, images perceptives et images mentales sont similaires, puisque sa pensée **conceptuelle** nécessite toujours une imagerie représentative.

La description qu'en fait T. GRANDIN permet de définir ainsi les images mentales : les images mentales sont des « **objets mentaux** » qui ont une étendue spatiale, une rigidité (persistance mentale) et une fluidité (persistance temporaire) que l'on peut manipuler psychiquement.

Certains cognitivistes parlent aussi d'**images mentales élaborées** à propos,

- des images reconstruites et remaniées sur un mode original par chacun,
- des pensées et des idées (concepts), lesquelles sont en fait des images de perception mais aussi imaginées selon une modélisation individualisée.

Jusqu'aux années 1970 on pensait que toute information quelle que soit sa modalité sensorielle, produisait dans le cerveau une représentation mentale unique indépendante de cette modalité. On sait maintenant que les élaborations mentales mais aussi la mémoire ont pour substrat des « images mentales ». Et, l'imagerie cérébrale montre que les cortex sensoriels sont recrutés aussi lors de processus mentaux élaborés.

III.3.3. Des images perceptives primaires aux images mentales, Comment se réalise l'intégration?

La madeleine de PROUST, par exemple, est une image mentale recomposée à partir d'une imagerie sensorielle complexe (gustative, visuelle, émotionnelle, contextuelle, et peut-être même kinesthésique).

Le fait que certains individus aient directement accès à des « images » au sens propre du mot image est un indice du substrat biologique recruté lors de ces élaborations mentales. Les circuits concernés sont également objectivés lors des pertes de fonctions ou par l'imagerie cérébrale.

Ainsi, lorsqu'on se rappelle la couleur rouge de sa voiture (c'est une pensée, un souvenir), l'imagerie fonctionnelle montre l'activation du cortex visuel primaire.

Pour comprendre la nécessité d'intégrer ce vaste répertoire d'informations pour agir, rappelons que la fonction globale du cerveau est d'être à chaque instant informé de ce qui se passe dans tout le corps, - « états somatiques » - et dans l'environnement extérieur⁴² afin que puisse se réaliser un ajustement convenable entre le corps (ajustement de survie), l'environnement et le cerveau lui-même (boucles permanentes de ré-information et de ré-ajustement).

Cet ajustement nécessite une grande **connectivité** entre les différentes « zones-ressources » concernées (aires somatotopiques par exemple) et les structures intégratives recrutées [EDELMAN, 2004].

Quelles sont les zones ressources et les voies empruntées ?

La circulation des informations, images mentales et « re-présentations », participant à cette dynamique cérébrale globale, pourrait emprunter les voies nerveuses du « noyau dynamique » proposé par EDELMAN.

III.3.4. Un modèle biologique, le noyau dynamique d'EDELMAN

Les structures du noyau dynamique et les fonctions identifiées qu'on leur connaît cliniquement répondent selon EDELMAN à tous les critères requis (information, connexion, intégration, différenciation).

Les différentes zones-ressources interconnectées du « noyau dynamique » sont notamment :

- **Le tronc cérébral, et l'hypothalamus** qui traitent les perceptions en provenance des organes internes.
- **Le thalamus** par où transitent les perceptions sensorielles externes avant de rejoindre les **cortex primaires**, reliés entre eux par les **aires associatives** (l'ensemble de ces structures participe à la mémoire personnelle qui sous-tend la connaissance).
- **Les ganglions de la base** qui régulent les réponses automatiques non conscientes et informent le cortex via le **thalamus**.
- Le dernier niveau est alors représenté par le **cortex préfrontal** qui intègre l'ensemble. C'est le niveau supérieur de la « hiérarchie ». Il se développe en dernier et assure donc le contrôle final. Sans ce dernier niveau il ne peut y avoir ni mémoire ni apprentissage. La tomographie (TEP) indique que toute tâche nouvelle ou complexe implique ce cortex préfrontal.

Conclusions :

Tous les réseaux de la mémoire perceptive et motrice s'organisent hiérarchiquement à **partir des cortex primaires sensoriels et moteurs** qui sont les « *fondations* » anatomiques de notre mémoire phylétique et le premier soubassement de notre mémoire personnelle car la formation de nouveaux souvenirs active toujours à la base cette « mémoire » sensorielle.

L'information mémorisée est présente dans les circuits neuronaux sous **différentes modalités** ou représentations concomitantes et connexes, conscientes ou non conscientes.

⁴² Ces états somatiques spontanés façonnés lors de situations de type punition-récompense peuvent venir à la conscience, mais cet inconscient biologique (fonctions végétatives régulées par le SN végétatif autonome) n'est pas assimilable à l'inconscient psychanalytique (connaissances acquises refoulées).

Chez l'homme et les primates non humains la mémoire est « stockée » dans la complexité des réseaux de neurones du cortex. Elle s'auto-organise selon les entrées qu'elle reçoit : perceptions sensorielles, émotionnelles, issues de l'imagerie mentale acquise par chacun, en auto-information ou ré-information permanente (EDELMAN parle de réentrance⁴³).

Cette ré-information permanente vient du fait que **l'influx nerveux ne rencontre jamais de "cul-de-sac" dans le cerveau; son point d'arrivée dans une région est toujours un point de départ potentiel vers d'autres neurones⁴⁴.**

Cette configuration notamment au niveau du néo-cortex est en permanent remodelage lors des apprentissages, et sous l'effet des expériences vécues.

Puisque le nombre des associations potentielles est quasi infini celui des réseaux potentiels l'est aussi. La mémoire a une capacité théoriquement illimitée.

Que dit maintenant l'imagerie fonctionnelle de ces « images mentales » en mathématique, artefact culturel hautement symbolique et conceptuel ?

III.4. Intelligences, activités cérébrales et Mathématique

Nous approchons maintenant l'organisation et le fonctionnement du cerveau : l'imagerie cérébrale fonctionnelle, l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), la Tomographie par Emission de Positons (TEP) et l'Electro Encéphalographie (EEg) nous renseignent.

Il n'y a pas de « bosse des maths » mais des territoires et des réseaux **dispersés** dans tout le cerveau.

III.4.1. Mathématique et intelligence visuo-spatiale

En France les travaux de DEHAENE⁴⁵ et HOUDÉ⁴⁶ objectivés par les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle⁴⁷, apportent des résultats sérieux sur l'activité des aires et des sous-unités cérébrales recrutées lors de manipulations simples de nombres. Lorsque le sujet pense à un nombre ou lorsqu'il effectue des calculs arithmétiques, de multiples régions distribuées, dont les lobes pariétaux et frontaux, situées dans les deux hémisphères sont activées. Cependant selon la tâche effectuée, comparaison de deux nombres, addition, soustraction ou multiplication, des aires cérébrales différentes sont requises.

⁴³ Pour parler de ré-information C. EDELMAN a introduit le concept de **Réentrance** et **Réentrée** dont il donne la définition suivante : « Réentrée : *Processus permanent dynamique de signalisation récursive passant par des fibres réciproques massivement parallèles qui connectent les cartes ; Ce processus se traduit par une liaison et il est à la base de l'émergence de la conscience en vertu du fonctionnement du noyau dynamique. Permet à des événements cohérents et synchrones d'apparaître dans le cerveau ; il est donc la base de la corrélation temporaire* » [EDELMAN, 2004].

⁴⁴ Tout parent et éducateur devrait avoir intériorisé cette donnée : quand des petits enfants dont le cerveau encore « naïf » se trouvent confiés de nombreuses heures à la « nounou-télé » ou quand des ados sont engagés émotionnellement et presque exclusivement dans des jeux vidéos destructeurs, leurs visions, perceptions, puis leurs pensées sont biologiquement équivalent à des actions. Dans le cerveau il n'y a pas de « cul de sac », tout élément de l'environnement fait sens pour la mécanique nerveuse qui perçoit et trie, sans recruter la conscience.

⁴⁵ DEHAENE S. (2001), « *Entretien avec STANISLAS DEHAENE : Qu'est ce qu'un nombre?* », La Recherche n°346, Octobre 2001, p46-48.

⁴⁶ HOUDÉ O. (2004), « *Vers une pédagogie mieux adaptée* », Cerveau & Psycho, n°3, 2003, pp 60-63.

⁴⁷ Sous la direction de STANISLAS DEHAENE, ces travaux de recherche associent des chercheurs de différents laboratoires et de différents domaines de la connaissance : le Service Hospitalier Frédéric Joliot du CEA à Orsay, l'INSERM U562 Neuro-imagerie Cognitive à Orsay et à Paris-Hôpital de la Salpêtrière, l'INSERM U-334 Résonance magnétique nucléaire dirigé par DENIS LE BIHAN, l'EHESS-CNRS UMR8554 Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique.

Les représentations mentales des nombres

Dans le cerveau, le traitement mental des nombres a un statut particulier, qui est lié d'une part à la **dénomination verbale** des nombres (exemple : deux pour la notation arabe 2) et d'autre part à la **quantité** qu'il représente. Cette double caractéristique induit un traitement particulier des nombres par rapport aux autres mots du langage.

La dénomination verbale des nombres (deux), fait appel à la zone du langage, l'aire de Broca, située dans l'hémisphère gauche. Seul le mot est reconnu dans cette zone cérébrale qui ne peut en comprendre le sens. Celui-ci est traité dans d'autres régions cérébrales qui sont le produit de l'évolution.

Des expériences ont montré que la perception de la numérosité se retrouve chez certains animaux, comme le pigeon, le rat, le singe, et chez les bébés humains (dénombrement limité aux petits nombres <4 ou 5). La perception intuitive de la numérosité est donc une capacité innée et non acquise [DEHAENE, 1997].

Selon l'auteur nous disposons dans nos circuits cérébraux d'une capacité innée⁴⁸ pour traiter la quantification des petits nombres. Un nourrisson dès quatre mois sait discriminer les petites quantités. Il fait la différence entre un Mickey ou deux Mickey. Les calculs approximatifs font appel à cette perception intuitive innée des ordres de grandeurs, tandis que le calcul exact nécessite de nouvelles ressources cérébrales, fruit d'un apprentissage lié aux symboles et à la culture, ils sont transmis donc acquis culturellement.

Calculs arithmétiques et principales zones cérébrales concernées

DEHAENE-COHEN montrent que selon le type d'opérations arithmétiques réalisées par le sujet, des régions cérébrales différentes s'activent.

Pour comparer deux nombres entre eux, les sujets font en majorité appel à des images mentales plus ou moins conscientisées. Ils imaginent les nombres alignés sur une droite qui va de la gauche vers la droite. Les chercheurs l'appellent la ligne numérique mentale des nombres⁴⁹.

Ainsi lorsque le sujet effectue une comparaison entre deux nombres, c'est une petite zone pariétale inférieure principalement située à droite qui s'active.

Dans le cas de la soustraction ce sont des aires pariétales inférieures à droite et à gauche qui sont simultanément activées car elles permettent de « **visualiser** » mais également l'aire préfrontale gauche. L'imagerie ici est requise pour traiter les quantités et gérer les calculs intermédiaires (aires préfrontales). Toujours selon DEHAENE pour résoudre la moindre soustraction c'est dix à quinze aires cérébrales qui se coordonnent et agissent de façon concomitante.

Lorsque le sujet effectue une multiplication, c'est principalement la zone pariétale gauche qui est activée. Les auteurs expliquent ces différences en mentionnant que la multiplication fait appel à des tables de multiplication apprises par cœur. Les aires requises sont alors du ressort de la mémorisation du langage. Le centre du langage étant situé dans l'hémisphère gauche, pour la majorité des droitiers.

Les recherches réalisées par d'autres équipes étrangères confirment que le sillon intrapariétal bilatéral est systématiquement activé dès que les sujets sont engagés dans des calculs mentaux. Ce qui laisse penser que le sillon intrapariétal joue un rôle central dans la représentation des quantités et leur manipulation, et qu'il serait à la base de nos compétences en arithmétiques [DEHAENE & al. 2004].

Le modèle cognitif du triple code de DEHAENE-COHEN

DEHAENE en 1992 et DEHAENE-COHEN en 1995 ont proposé un modèle du traitement des nombres : le modèle du triple code. Ce modèle qui découle d'observations postule qu'il existe trois codages différents : un codage **analogique** faisant appel à la ligne mentale des nombres, un codage **visuel** sous forme de symboles arabes et un codage **auditif/verbal**, basé sur le langage. Selon le type

⁴⁸ Cette capacité serait le fruit de l'adaptation et de l'évolution.

⁴⁹ Certains sujets voient les nombres ordonnés selon des rubans colorés. De telles constatations avaient déjà été rapportées par FRANCIS GALTON.

d'opérations arithmétiques réalisées, calcul approximatif, calcul exact, comparaison, addition, soustraction, multiplication, le sujet utilise la représentation la mieux adaptée au traitement. Au cours des étapes du traitement, un transcodage inconscient⁵⁰ d'une représentation dans une autre est réalisé, cf. le schéma du modèle « triple code » de DEHAENE-COHEN.

L'hémisphère **gauche** supporte les trois types de codage, analogique, arabe, verbal, tandis que l'hémisphère **droit** ne supporte que deux représentations : analogique et arabe (ceci pour la grande majorité des droitiers).

Les échanges entre l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche pour les représentations analogique et arabe se font via le corps calleux – ensemble de plus de 200 millions de fibres de substance blanche⁵¹ (axones). Le corps calleux jouerait un rôle dans les capacités de transcodage entre ces trois codages et agirait sur la vitesse de traitement de l'information.

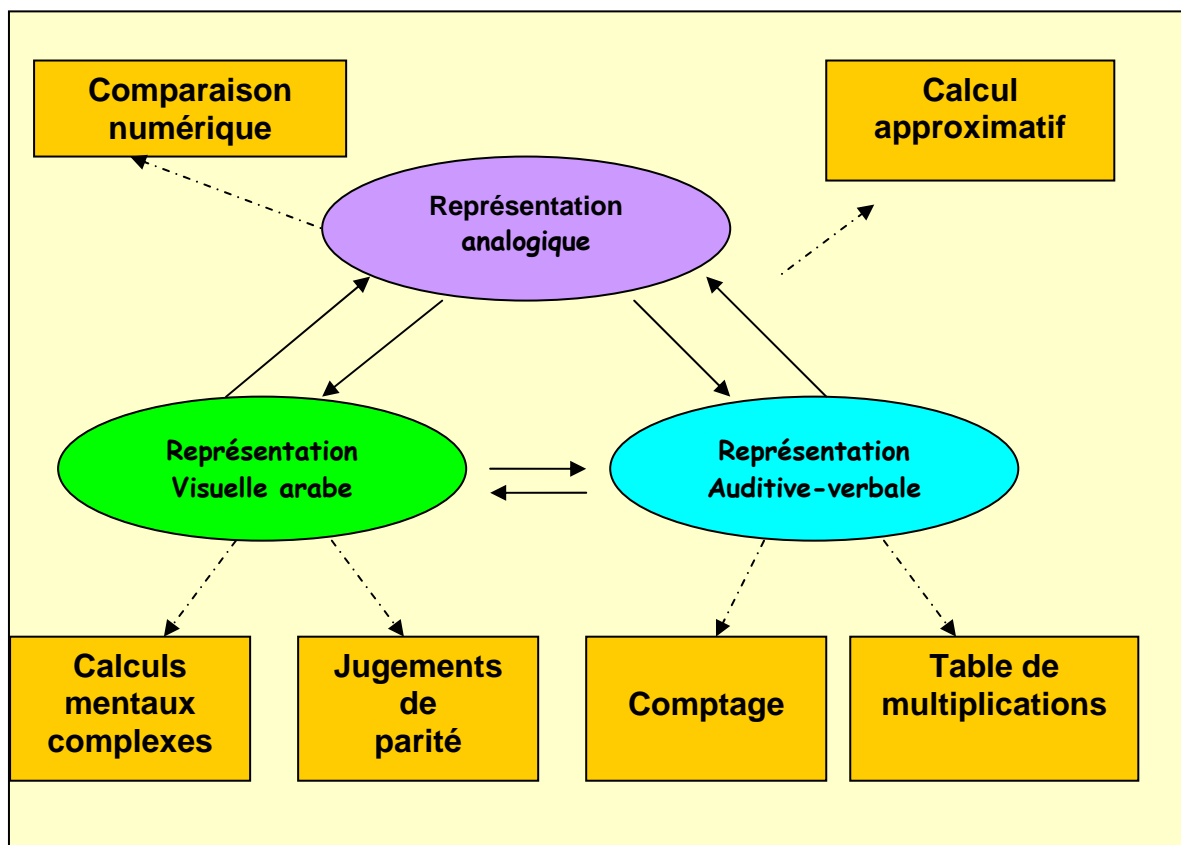


Schéma du modèle du « triple code » de DEHAENE-COHEN emprunté à CATHY LEMER⁵²
Ce schéma représente les possibilités de communication entre les trois représentations : analogique, visuelle, verbale. Les flèches pointillées associent une forme de représentation à une tâche.

Troubles du calcul chez l'enfant « La Dyscalculie »

L'absence de perception des nombres en « amont », en liaison avec l'absence d'une des représentations mentales pourrait expliquer les difficultés rencontrées en calcul mental par certains enfants. Cette déficience dénommée « dyscalculie » est contrairement à la dyslexie, peu connue et mal diagnostiquée DEHAENE & AL. [2004]. D'après les auteurs l'origine de ce trouble pourrait être d'ordre génétique en rapport avec une désorganisation des neurones de la région intrapariétale du cortex. Un des axes de recherches en (ré)-éducation vise à développer dans ce cas une approche de la perception des nombres en l'associant à des manipulations des doigts (re-médiation cognitive à

⁵⁰ Les capacités hors du commun de certains « autistes-calculateurs » ou « idiots-savants » sont une source d'informations sur les aptitudes latentes et inconscientes.

⁵¹ Ce chiffre est une estimation. Certains estiment que le corps calleux pourrait atteindre 800 millions de fibres.

⁵² LERNER C. (2003), « Acalculies, Un examen rapide (mais réfléchi) du calcul », Neurologie, Mai 2003, Vol. 6.

l'aide d'une autre modalité de perception). Ces techniques ont pour objectif de créer des représentations mentales des quantités en associant du corporel et de l'abstrait (DESCARTES aujourd'hui serait surpris).

Cette rééducation s'appuie rappelons-le encore sur la capacité à reconfigurer ses réseaux du cerveau donc sur la plasticité synaptique.

Dans l'apprentissage du calcul, compter sur les doigts joue un rôle fondamental. Depuis des générations nombre d'éducateurs, mais pas tous, l'avaient pressenti et ne l'interdisaient pas, car la plupart des enfants le font spontanément, et sans *a priori*, ces éducateurs prenaient en compte ce besoin de l'enfant.

III.4.2. Intelligence linguistique et logique

Selon HOUDÉ, on a longtemps associé l'intelligence aux compétences en logique et mathématique. Or les recherches actuelles montrent que l'aire de Broca, aire intervenant dans le traitement perceptif du langage se trouve aussi requise quand le sujet traite des problèmes de logique. Les tâches cognitives liées au langage et à la logique sont donc étroitement associées au niveau cortical⁵³.

Tandis que lorsqu'un sujet effectue des opérations arithmétiques ce sont essentiellement des régions visuo/spatiales des lobes pariétaux et les lobes frontaux des deux hémisphères qui sont requises. L'intelligence visuo/spatiale (lobes pariétaux) permet de visualiser les opérations à réaliser tout en mémorisant les calculs intermédiaires (lobes frontaux)

La proposition de HOUDÉ serait de revoir la nature des associations, intelligence linguistique et logique d'une part et mathématiques & intelligence visuo/spatiale d'autre part.

III.4.3 Les mathématiques, art et artefact

Le traitement mental des nombres est une activité complexe que l'on commence tout juste à analyser finement grâce aux nouvelles techniques. Lire, écrire, répéter, comprendre, calculer ne font pas appel aux mêmes aires cérébrales, mais les communications entre les aires sont indispensables. DEHAENE dit, dans son ouvrage « *La bosse des maths* » que la dénomination hétérogène onze, douze, treize, etc. ajoutée à l'hétérogénéité des dizaines dans la langue française (10 (dix), 20 (vingt), ... 70 (soixante dix =60+10), 80 (4*20), 90 (4*20 + 10), est une source de complications. Cette dénomination empêche certains enfants de découvrir par eux-mêmes les règles qui président à l'organisation des nombres (perception faussée). Les petits chinois ont plus de chance ils disent « dix-un » pour onze, « dix-deux » pour douze etc. Ils ont ainsi beaucoup moins de mots à apprendre et le traitement mental est plus rapide car plus cohérent. Une étude américaine a montré que ce serait la raison du retard d'un an, à l'apprentissage du comptage, des petits américains par rapport aux petits chinois (sans oublier le boulier plus concret).

En mathématique, bien nommer les objets pour accéder à leur sens et les mémoriser est une stratégie opérationnelle. Les anglo-saxons utilisent le concept de « *one to one* » pour parler d'une application bijective. C'est une dénomination imagée compréhensible par tous qui se passe de commentaire. Par exemple, qui après avoir terminé ses études depuis 20 ans saurait encore la différence entre une application surjective et une application injective ?

Dans la logique⁵⁴ évolutionniste, l'enfant n'« entend » et ne mémorise que ce qui est en congruence et qui a du sens avec ses acquis, fruit de ses expériences intériorisées.

Toute incohérence constitue pour lui, c'est-à-dire pour sa logique cérébrale, un obstacle voire un blocage à la nouveauté.

La logique est un acquis fonctionnel de l'évolution. Le mode logique permet l'adéquation au réel et l'ajustement de l'action, il optimise donc en terme évolutionniste les chances de survie.

⁵³ Parmi les 8 types d'intelligence reconnues aujourd'hui [GARDNER 1998], l'école actuelle sélectionne l'excellence selon 2 critères sur 8 : l'intelligence verbo-linguistique dans les petites classes, puis l'intelligence logico-mathématique devient ensuite prépondérante et hautement « sélectionniste ».

⁵⁴ Logique ou cohérence de survie.

Cette logique **de l'action** s'appuie par contrainte biologique sur les données mémorisées au cours des expériences dans la « connectique » neuronale du sujet :

- Les souvenirs perceptifs
- Les « représentations » mentales (dans sa période d'incubation, sur la théorie de la relativité, EINSTEIN s'imaginait chevauchant un rayon de lumière)
- Le langage ou les symboles (organiseurs de la pensée)

En mathématique, le calcul formel, démonstration à base de théorèmes et de logique, conduit à valider le raisonnement mais n'apporte pas la compréhension [LE GUEN, 1999-2]. Pour comprendre, le sujet doit s'en construire une représentation générale⁵⁵, sans doute à partir d'images mentales, dérivées d'une imagerie corticale primaire. En effet, on sait maintenant que les images concrètes mobilisent essentiellement les aires sensorielles primaires et secondaires, alors que les concepts ont une connectivité beaucoup plus étendue. Réciproquement les concepts correspondent à des images abstraites qui mobilisent à leur tour des aires associatives et des aires motrices [CHANGEUX & RICOEUR 2000]. Lorsque le sujet entend sans comprendre l'activité cérébrale se limite au système auditif. Lorsqu'il comprend, l'activité de son cerveau envahit un plus grand nombre d'aires cérébrales. Une synchronisation entre ces aires doit s'opérer.

Conclusion : Les images mentales sont des objets mentaux mais également des outils qu'utilise le cerveau au même titre que le langage et la logique. Ne pas en avoir conscience pour certains, n'implique pas leur inexistence bio-logique.

La pensée ne s'affranchit pas du corporel. Comprendre le soubassement biologique est indispensable pour appréhender les mécanismes qui sous-tendent les traitements mentaux complexes tels que prises de décisions, choix, raisonnements mathématiques...

Penser encore ces traitements mentaux comme « supérieurs », traduit sans doute, une méconnaissance des acquis scientifiques de ces dix dernières années. Cette méconnaissance du fonctionnement cérébral, héritier de son histoire, handicape et pénalise la transmission pédagogique.

Dans les années 1970, l'absence de connaissance sur la variabilité des stratégies individuelles et leur efficacité relative (capacités cognitives des apprenants) se traduit dans les faits par un échec attesté de l'enseignement des mathématiques modernes. Cet enseignement appliqué dès le primaire et le secondaire, reposait principalement sur l'axiomatique, la théorie des ensembles, les structures algébriques, les espaces vectoriels. La disparition de la géométrie - « *A bas Euclide !* » ou encore « *Ce n'est plus la peine d'apprendre la géométrie puisque tout se démontre avec l'algèbre* » disait JEAN DIEUDONNÉ - faisait fi des images visuelles et mentales acquises en fait par le mathématicien confirmé. Ces mathématiques modernes, ne permettaient plus à l'apprenant « novice » de s'appuyer sur son expérience du concret, expérience nécessaire à « l'intériorisation cérébrale ». Les mathématiciens étaient arrivés en haut de l'échelle, mais ils avaient en quelque sorte retiré l'échelle qui aurait permis à l'apprenant, d'atteindre lui aussi la lumière. Parmi les apprenants certains atteignaient la pénombre d'autres restaient dans l'obscurité.

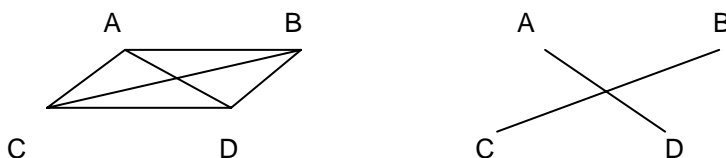
L'exemple rapporté par STELLA BARUK⁵⁶ en est une illustration.

Enseignement 1904-1970

Le cours commence par une définition naturelle est intuitive :

« Le parallélogramme est un quadrilatère dont les côtés sont parallèles deux à deux ».

Les propriétés de cette figure sont ensuite démontrées à coups d'angles et de longueurs.



⁵⁵ Donner du sens à l'information entrée, en cohérence avec ce que l'on sait déjà, est une condition à la mémorisation à long terme. L'enfant qui ne « com-prend » pas (prendre avec soi = intérioriser), reste en dehors du sujet (par inhibition).

⁵⁶ BARUK S. (2001), Dossier « L'échec des maths à l'école », *Science et Vie*, n°1008, Septembre, p36-52.

Enseignement moderne 1970-1975

Le cours commence par une définition beaucoup moins intuitive.

« On dit qu'un quadruplet (A,B,C,D) est un parallélogramme quand 2 points occupant des places de parité, sont homologues dans la symétrie qui échange les 2 autres ». Elle est suivie de théorèmes démontrés par des relations de symétrie.

Dès 1975, au vu des résultats catastrophiques, l'association des professeurs de Mathématiques, l'APMEP a réagi, mais ce n'est qu'en 1985, que les mathématiques modernes furent retirées des programmes des classes primaires et secondaires. Il reste cependant, des traces dans l'esprit des mathématiciens français, les uns étant « pour » et d'autres « contre ». La querelle de l'abstrait contre le concret est toujours présente.

Pour l'heure, l'enseignement des mathématiques reste un problème majeur. Cet enseignement est souvent associé à des inquiétudes, des angoisses, des phobies, voire des traumatismes, comme le montre l'enquête PISA 2003⁵⁷. Cette enquête centrée sur les aptitudes des élèves de 15 ans, à utiliser les mathématiques pour résoudre des problèmes de la vie courante, a porté sur 41 pays, dont 30 pays de l'OCDE. Des questions portant sur l'anxiété vis-à-vis des classes et devoirs de mathématiques étaient également posées. L'enquête PISA révèle qu'une proportion considérable d'élèves de 15 ans avoue se sentir impuissante ou émotionnellement stressée lorsqu'elle fait des mathématiques. En moyenne, dans les pays de l'OCDE, 50 pour cent des garçons et plus de 60 pour cent des filles affirment qu'ils s'inquiètent souvent en pensant qu'ils auront des difficultés en cours de mathématiques et à l'idée d'avoir des mauvaises notes. Les degrés les plus élevés d'anxiété s'observent en Corée, en Espagne, en France, etc., les plus faibles, au Danemark, en Finlande, aux Pays-bas et en Suède [OCDE 2004, *Apprendre aujourd'hui, réussir demain* -Premiers résultats de PISA 2003]. Les résultats de cette enquête amènent plusieurs pays à remettre en cause leurs techniques d'enseignement des mathématiques.

Lors de la dernière manifestation de « La Science en fête 2005 » à la Cité des Sciences, BORIS CYRULNIK indiquait, dans son intervention, que dans les cas « d'attachement précoce **insécure** », le premier déficit scolaire relevé se portait sur les mathématiques. Comprendre ce qui se passe dans la tête de l'apprenant, ses stratégies⁵⁸ et ses pré-requis devient alors une priorité.

III.4.4. Créativité et Mathématique

Reprenons les récits de POINCARÉ et HADAMARD. POINCARÉ affirmait, c'est par l'intuition qu'on invente et par la logique qu'on démontre. Il ajoutait que l'intuition faisait chez lui essentiellement appel à des images mentales, sans logique apparente, tandis que la démonstration réclamait au contraire un raisonnement logique se déroulant pas à pas. Il était le défenseur de la prééminence de l'intuition.

POINCARÉ distingua dans la création mathématique quatre étapes : **préparation, incubation, illumination et vérification**⁵⁹. Dans la phase de préparation, il faut acquérir des informations qui sont dissociées, parcellaires, il faut rassembler des indices sans cohérence apparente. Dans la phase d'incubation, l'esprit cherche à relier ces informations et indices pour trouver une cohérence, une logique, donner du sens. Dans cette deuxième phase, ce ne sont pas les mots qui sont traités mais des signes et des images. Puis soudain vient une illumination, quelque chose de très rapide, fugitif, une sensation d'avoir compris la cohérence. C'est l'instant où l'on dit « Eureka », ou « Insight » pour les anglo-saxons. On a alors une compréhension globale du problème à résoudre, « une entière certitude » selon POINCARÉ, ou « une certitude émotionnelle » dirait DAMASIO. La dernière étape va consister à vérifier, en démontrant par un raisonnement logique, linéaire, ce que l'on a pressenti ou ressenti. Cette étape de vérification est souvent très longue et empreinte de doutes. Mais poursuit POINCARÉ, on est guidé par la presque certitude « intérieure » indéfectible d'avoir découvert une

⁵⁷ L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) a lancé le Programme International de Suivi des Acquis (PISA) pour répondre au besoin d'évaluation et de comparaisons internationales des performances des élèves.

⁵⁸ N'oublions pas qu'il ne peut y avoir d'apprentissage sans intervention sous-jacente du cerveau mammalien. Le cerveau associatif limbique joue un rôle central dans l'intégration qu'opère notre esprit entre rationnel et émotionnel.

⁵⁹ POINCARÉ H. (1908), « *L'Invention Mathématique* », conférence publiée dans le Bulletin de l'Institut Général Psychologique, 8^{ème} année, n°3, mai-juin 1908, p.175-187.

vérité. C'est ensuite seulement que l'on pourra porter un jugement raisonné, « pour l'acquis de ma conscience » disait encore POINCARÉ.

Plus près de nous, ANDREW WILES après des années de recherche trouva en 1996, la démonstration du dernier théorème de Fermat⁶⁰. Le film *Fermat's Last theorem* (John Lynch, 1996) consacré à son histoire montre son bureau où s'empilent des monceaux de feuilles blanches noircies de formules. WILES passa ainsi des années, enfermé et déconnecté de sa communauté, effectuant un travail intense, pour qu'un jour une idée « *fulgurante* » lui fasse entrevoir en un instant la solution ou plutôt la voie de résolution du problème qu'il recherchait. Ce film permet d'approcher l'émotion intense que ressent encore WILES en évoquant cet instant de découverte.

L'analyse du processus créatif, faite par HADAMARD et POINCARÉ⁶¹, et les narrations des « inventeurs », comme Roland Moreno⁶², sont parfaitement en accord avec les connaissances sur la dynamique de la plasticité cérébrale, les reconfigurations de réseaux neuronaux et la réinformation permanente par les nouvelles entrées perçues ou imaginées.

- La phase de préparation est celle pendant laquelle, certains sous-réseaux de neurones sont mobilisés engrangeant les informations et les connaissances dans leur connectique.
- Puis dans la phase d'incubation les sous-réseaux mobilisés se connectent et s'organisent, en recrutant d'autres éventuellement, au fur et à mesure des pensées du chercheur, au grès des associations entre ses « représentations mentales ». Cette phase d'incubation (réflexion) peut être très longue. POINCARÉ nous dit que sa réflexion sur les fonctions fuchsiennes s'est étalée sur plusieurs années.
- Puis soudainement alors qu'il montait une marche dans un omnibus à Coutances (Manche) il réalisa dans une fraction de seconde le lien entre les transformations des fonctions fuchsiennes et celles de la géométrie euclidienne. L'instant d'illumination correspond à l'émergence brutale d'une compréhension soudaine⁶³. Pour POINCARÉ l'illumination est venue hors un contexte de recherche proprement dit mais au sein d'un esprit préparé.
- La démonstration logique basée sur un raisonnement axiomatique vient ensuite. C'est cette démonstration qui permet la communication et l'adhésion des pairs, à la nouvelle « vérité ».

Conclusion

Il nous semble que l'**intuition** est une « émergence » aléatoire (au sens de la théorie des systèmes complexes) du fonctionnement de l'outil cérébral lui-même. Chaque cerveau est le produit de sa propre histoire, affective psychique et culturelle et dans cette perspective optimiste et biologiste chaque cerveau est potentiellement créateur.

La **démonstration** est un processus d'élaboration conscient. Laborieuse production culturelle dont chaque étape requiert la conscience, des requis acquis et des représentations culturelles, partagés

⁶⁰ Théorème de Fermat : $x^n + y^n = z^n$ n'a pas de solutions entières pour $n > 2$. Pendant 4 siècles, ce fut la grande énigme qui agita le monde des mathématiciens.

⁶¹ « À ce moment, je quittai Caen, où j'habitais alors, pour prendre part à une course géologique entreprise par l'École des Mines. Les péripéties du voyage me firent oublier mes travaux mathématiques ; arrivés à Coutances, nous montâmes dans un omnibus pour je ne sais quelle promenade ; au moment où je mettais le pied sur le marchepied, l'idée me vint sans que rien dans mes pensées antérieures parût m'y avoir préparé, que les transformations dont j'avais fait usage pour définir les fonctions fuchsiennes étaient identiques à celles de la géométrie non euclidienne. Je ne fis pas la vérification : je n'en aurais pas eu le temps, puisque, à peine assis dans l'omnibus, je repris la conversation commencée, mais j'eus tout de suite une entière certitude. De retour à Caen, je vérifiais le résultat à tête reposée pour l'acquies de ma conscience ». [POINCARÉ 1908].

⁶² ROLAND MORENO est l'inventeur de la carte à puces.

⁶³ EDELMAN expliquerait peut être l'instant d'illumination par le phénomène d'**intégration** dont il donne la définition suivante :

« En neurosciences, corrélation ou connexion de signaux pour susciter une sortie unitaire » [EDELMAN, 2004].

par les pairs. Pairs qu'il faut convaincre. Convaincre en congruence avec leur propre configuration mentale.

Les pairs jouent souvent le rôle de « passeur » culturel comme l'indique HADAMARD⁶⁴ à propos de la découverte des formes quadratiques et d'une démonstration proposée par HERMITE dans ses cours à la Sorbonne : « *Cet extraordinaire phénomène fut, quelques années plus tard, expliqué partiellement par une interprétation géométrique (donnée naturellement non par HERMITE, mais par KLEIN) ; mais elle ne devint entièrement claire pour moi qu'après avoir lu la conception que s'en faisait POINCARÉ, dans une de ses premières notes* ».

III.4.5. Créativité et Innovation

En ce début de XXI^e les bouleversements économiques, la mondialisation, l'obsolescence technologique, montrent l'importance de la création, de l'innovation et comme préalable à celles-ci le partage des bases culturelles acquises. Nous n'aborderons pas ici ce thème qui nécessiterait plus de développement, mais nous mentionnerons quelques idées.

Les recherches actuelles, sur le processus de créativité dans d'autres domaines que les mathématiques, s'inspirent de l'analyse du processus de la création faite au début du XX^e siècle par WALLAS⁶⁵, HADAMARD et POINCARÉ.

La créativité est souvent le fait de quelques rares esprits marginaux, en rupture avec l'ordre établi. Leur créativité ne passe pas par des mots et des enchaînements linéaires, rigoureux et logiques, mais plutôt par un processus mental d'associations où l'imagerie analogique et les représentations mentales sont des sources d'inspiration. LÉONARD DE VINCI est sans doute le plus représentatif de ces esprits innovants.

Avec le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication, l'importance prise par la visualisation scientifique dans le processus de découverte scientifique fera appel à des esprits créatifs aux **capacités associatives** reposant sur des talents de type **visuo-spatial**.

Ainsi les personnes dyslexiques, rejetées (encore il y a quelques années) par le système éducatif, comme mauvaises élèves (leurs talents n'étant pas adaptés aux stratégies normatives d'apprentissage, verbo-linguistiques notamment) sont souvent des « gourous » en innovation informatique⁶⁶.

IV. Prise en compte des acquis cognitifs dans la culture actuelle

Les acquis cognitifs récents sont déjà pris en compte dans différents domaines, nous le montrerons sur deux exemples.

Par contre l'éducation familiale, scolaire et le contexte socio-culturel nous semblent malheureusement en retard dans ce domaine. Si l'on prend en considération l'état de sensibilisation et de diffusion dans la société des acquis cognitifs on pourrait qualifier, de façon volontairement un peu provocatrice, la transmission culturelle de stade « proto-scientifique ».

Avant de citer quelques exemples, résumons ces données cognitives désormais incontournables.

IV.1. Les données nouvelles

- Le cerveau est bien un prodige de complexité, l'objet le plus complexe de l'univers connu.

⁶⁴ Le rôle du passeur est fort bien analysé dans ses dimensions historique et culturelles par ELISABETH ROLAND GOSSELIN dans son ouvrage « *Passeurs, Antipasseurs, et nous... Recherches sur le personnage du passeur* ».

⁶⁵ GRAHAM WALLAS (1926) dans « *The Art of Thought* » a également proposé ces 4 étapes du processus créatif : préparation, incubation, illumination et **évaluation**, mais il ne mentionnait pas l'importance de l'imagerie mentale.

⁶⁶ THOMAS G. WEST « *Dyslexic Talents & Nobel Prizes* », Center for the Study of Dyslexia and Talent, <http://www.krasnow.gmu.edu/twest/>

- Nos 30000 gènes ne sont pas des « programmes » mais, notamment concernant le néocortex, les prescriptions de nos gènes ne sont que **des données** par lesquelles sont levées des options quant au développement, à l'entretien et à l'adaptation de l'individu au particularisme de son milieu de vie.
- Le cerveau **n'est pas un ordinateur** mais chacun de nos 100 milliards de neurones en est un.
- Le câblage primitif inné de notre cerveau est notre **mémoire d'espèce**.
- Le câblage de notre néocortex dont la configuration essentielle est acquise par « épigénie » après notre naissance, est notre **mémoire individuelle**, l'ensemble de ces deux mémoires forme le fondement de notre personnalité.
- La biochimie de notre cerveau ne diffère pas de celle des autres espèces avec lesquelles nous partageons des ancêtres communs (mais les ingrédients ne sont ni la recette ni la pratique).
- La névroglie et notamment les astrocytes, encore plus nombreux que les neurones interviennent dans la modulation de l'information. Certains parlent d'ailleurs à leur sujet de deuxième cerveau.
- Le cerveau (néo-cortex essentiellement) est **en permanence modifié** par les « excitations-informations » qu'il reçoit. Le même geste appris ne fera pas intervenir les mêmes groupes de neurones même chez deux jumeaux homozygotes.
- Chaque événement « marquant » s'inscrit dans nos circuits neuronaux, c'est pourquoi d'ailleurs le rappel est toujours possible.
- L'intelligence **vivante** est multiple : la véritable intelligence somme de toutes les autres, ne saurait être quantifiée : comment évaluer la connectivité d'un million de milliards de synapses au sein d'un nombre illimité de réseaux variables ?
- Spontanément, et c'est une propriété qui dérive de son ontogenèse, le cerveau fonctionne de façon privilégiée selon le mode chronologique historique : le réseau plus ancien « parle » d'abord », le plus renforcé, aura la priorité d'accès. Le dernier acquis sera aussi le premier perdu (comme l'illustre le cas de la dégénérescence sénile).
- Dans la dynamique cérébrale on ne peut séparer le corps, des pensées et du **contexte environnemental**, car la perception globale en intègre toutes les informations simultanément⁶⁷.
- Seule l'entrée en lice de l'attention, de la concentration volontaires et donc de la conscience peuvent prendre l'ascendant et la préséance sur le fonctionnement spontané automatisé.
- Mais cela se réalise au prix d'une **dépense énergétique** (travail biologique et métabolique synaptique) conséquente et mesurable, ce qui rend compte de la difficulté à changer (de ses pensées aux artefacts créés)⁶⁸.
- La propriété que possède le cerveau humain de participer par la pensée, notamment par la création personnalisée de représentations mentales et d'interférer ainsi par réentrées corticales sur la dynamique de l'information corporelle globale (perceptive sensitive, perceptive émotionnelle) est une capacité semble-t-il, proprement humaine.
- Le niveau ultime de régulation-contrôle se situe au niveau du néocortex frontal, siège des délibérations psychiques et des prises de décision.
- L'histoire culturelle et individuelle fait du cerveau de chacun un **objet unique** de connaissance et d'action. Cet outil trouve sa limite dans la « domestication » par son environnement précoce. Mais il trouve surtout une ouverture extraordinaire vers la liberté puisque la **plasticité** et l'**auto-ré-information** notamment du néocortex en font une structure unique car reconfigurée par l'expérience personnelle, les apprentissages, les pensées créatrices émergées de l'ensemble et de l'environnement global qui le nourrit.

De nombreux exemples de rééducation fonctionnelle⁶⁹ ou de thérapie comportementale s'appuient sur l'ensemble de ces données, en voici deux.

⁶⁸ Revue *Sciences Humaines* (2000), « Le changement de l'individu aux sociétés », hors série, n°28, Mars-Avril-Mai 2000.

⁶⁹ Chez les aveugles par exemple : le cortex auditif « colonise », l'aire visuelle désaffectée pour effectuer le traitement accéléré de la parole (meilleure chez les aveugles), de même les professionnels du braille peuvent lire (aires visuelles) avec leurs doigts jusqu'à 200 mots à la minute.

IV.2. Rééducation fonctionnelle par activation de « l'imagerie mentale »

IV.2.1. L'entraînement mental des sportifs de haut niveau

Les sportifs de haut niveau utilisent les stratégies dévoilées par les sciences cognitives pour optimiser l'exécution de leurs mouvements (en favorisant la connectivité des zones ressources et donc le renforcement éventuel réciproque).

- 1) Ils utilisent l'**imagerie kinesthésique**, forme la plus complète de leur préparation car elle recrute tous les étages corporels du noyau dynamique.
- 2) Ils y associent des **sensations** kinesthésiques rythmiques, car notre cerveau possède la propriété de mémoriser dans sa connectique le contexte global [environnement-corps-cerveau] rencontré à certains moments marquants de l'entraînement par exemple.
- 3) Ils utilisent la **répétition mentale** des séquences gymniques pour associer la mémoire sémantique [JANSSENS, 2004].
- 4) Etc.

JEAN CLAUDE KILLY, triple champion olympique français fût le premier sportif occidental⁷⁰ à pratiquer spontanément la « visualisation » mentale dans les années 60 bien avant que l'imagerie cérébrale fonctionnelle ne révèle qu'effectivement **penser** une action et **la réaliser** activent de façon identique le cortex pré-moteur frontal générateur de l'action. Cette pratique globale illustre de nouveau l'interaction corps-conscience et inversement, ainsi que l'importance des expériences acquises dans la gestion mentale du présent.

Rappelons que toute prise de décision appelle en données-mémoire, non conscientes, les expériences acquises et mémorisées par nos structures neurales (connectique créée).

Ainsi lors d'un mouvement, notre cerveau se révèle être un système projectif qui anticipe pour « nous » et **qui planifie sur la base de nos expériences vécues l'action à réaliser**. Nous n'avons en fait que « le pouvoir de dire non ». Notre conscience n'est alertée que 500 ms après que la « représentation » de l'action se soit mise en place dans le cortex préfrontal. La « conscience » dispose de 200 ms pour stopper l'action ou laisser faire. Si le néo-cortex frontal est lésé ce pouvoir disparaît, l'action engagée se déroule alors spontanément, d'elle-même, telle que le cerveau l'a préparée avec les données précédemment acquises [SIRIGU A. & LAFARGUE G., 2004].

En conclusion :

Le cerveau est un **simulateur d'action** qui s'enrichit en permanence de ses **propres** acquis et qui s'optimise en automatisant ses réussites. C'est ce que les éducateurs appellent « *l'expérience de la réussite* » mais a contrario, cela peut-être aussi l'expérience de l'échec.

L'échec qui « déprime » le plaisir et la recherche de la nouveauté (dopamine), l'échec qui fait fuir la souffrance de l'échec répété (sérotonine) en anticipant le danger et donc en sélectionnant préférentiellement mais spontanément les idées noires.

IV.2.2. Piloter un ordinateur par la seule pensée volontaire

Piloter un ordinateur par la seule pensée volontaire, c'est ce que parvient à réaliser un patient totalement paralysé moteur sauf des muscles du visage (syndrome d'enfermement). Le patient utilise directement les ondes lentes de son cerveau (ondes SCP) lesquelles indiquent le niveau d'excitabilité de l'aire corticale activée.

Le patient met plusieurs semaines à réussir, **en fonction de son « imagerie personnelle »**, à maîtriser (plus de deux secondes) le tracé de ses ondes SCP. Lorsqu'il y parvient, le train d'ondes sur l'écran, est remplacé par une petite balle jaune que le malade peut faire monter ou descendre. Deux rectangles contenant la moitié des lettres de l'alphabet apparaissent en bas de l'écran. Par la maîtrise des ondes SCP par sa propre imagerie mentale le patient peut alors choisir étape par étape (5 étapes pour un caractère) une à une les lettres qu'il veut afficher. Une demi-heure est nécessaire pour écrire une phrase courte⁷¹.

⁷⁰ L'interaction corps-mental fait partie de la tradition orientale depuis plus de 4 millénaires.

⁷¹ Science et Avenir, (1999), « *L'esprit libre* », Septembre 1999.

Le physicien anglais paralysé, STEPHEN HAWKING atteint de sclérose amyotrophique utilise depuis de nombreuses années, une technologie similaire mais moins élaborée puisque ce sont ses clignements d'oeil (et non les ondes cérébrales) qui par l'intermédiaire d'un capteur permettent de sélectionner lettres et mots dans un tableau.

IV.3. Autres retombées « culturelles » acquises

IV.3.1. La culture nous modèle

La culture nous modèle, on commence seulement à en faire l'analyse objective [KÜHNEN, 2003].

« **Penser à l'occidentale et penser à l'orientale** » implique des réactions différentes, cela n'est pas nouveau⁷² mais ce que le cerveau nous apprend l'est plus. Les mécanismes de la pensée sont identiques sur la planète mais pour une même réalité environnementale perçue, **le contexte culturel agit sur les entrées cérébrales (filtre sélectif)** et influe donc en retour sur l'expression (« sortie » cérébrale) de la pensée (« référentiels » acquis par chacun).

Les enseignants en mathématique qui ont la double culture orientale et occidentale savent que l'utilisation du boulier influence la façon dont leurs élèves perçoivent et utilisent les nombres.

IV.3.2. La créativité humaine n'a pas de limite

Les publicitaires ont très vite saisi le gisement de ressources « profitables » que constituaient ces nouvelles connaissances. Pour explorer le cerveau des consommateurs, le **neuromarketing** recrute les meilleurs cerveaux. « *Nous sommes les premiers à mettre au service des entreprises toutes les connaissances fondamentales sur le rôle des zones cérébrales dans les émotions et le comportement* » dit STEPHEN KOSSLYN spécialiste de la vision et Professeur à l'Université de Harvard⁷³, consultant scientifique pour Coca Cola.

On voit par cet exemple que la créativité humaine n'a effectivement pas de limite.

Chaque individu est libre de remonter, par l'usage de sa propre pensée, aux motivations et motifs d'action qui ont généré ses comportements et de s'interroger en retour sur les retombées induites par ses choix personnels.

Comportements et « créations » culturelles remodelent notre environnement socio-économique et culturel lequel participe en retour à l'autoconstruction permanente (plasticité cérébrale) de cette hyper-structure complexe qu'est notre cerveau, la boucle est bouclée, [VENS-WAGNER, 2004].

La liberté humaine trouve là, dans le **structurel créé**, son terrain d'action « idéal ».

IV.4. Applications à l'Enseignement et à l'Éducation

Tournons-nous vers l'avenir des apprentissages qui nous rendront toujours plus humains puisque la connaissance de l'outil cérébral démontre qu'en terme d'humanité, lorsque l'enfant naît, il « ne-est ». Il résulte de cette perspective une conception dynamique de l'éducation des différentes facettes du **Potentiel Humain**, selon l'expression employée en 1948 par MARIA MONTESSORI.

Dans cet article nous nous sommes limitées à rapporter les bases biologiques auxquelles nous avons souvent eu recours avec nos élèves. Apprendre est un processus complexe qui fait appel à une pluridisciplinarité des « informations-savoirs ».

Nous laissons la place aux enseignants qui sont souvent parents⁷⁴, mettre en perspective notre essai et y faire leurs emplettes dont ils reviendront nous l'espérons réconfortés et dynamisés.

⁷² Le chamanisme toltèque par exemple parlait déjà de « domestication » du cerveau avant que les sciences cognitives ne s'intéressent au comment de ce modelage.

⁷³ Sciences & Avenir (1999), « Lire dans l'inconscient, Interviewer directement le cerveau », septembre.

⁷⁴ Et c'est souvent cette condition parentale qui a contribué pour l'essentiel disent-ils, à faire évoluer leurs propres croyances.

La « *neuropédagogie cognitive* » conforte certaines pratiques éducatives et apporte une perception élargie sur les compétences multiples des apprenants, sur la diversité de leurs stratégies de connaissance. Cette approche est nouvelle pour certains, elle devrait diffuser, par le biais de ses succès dans d'autres domaines, vers le monde éducatif et celui des développeurs de nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Voici quelques propositions.

Pour une entrée en matière nous avons beaucoup appris du magnifique film de EDELMANN C., « Un violon dans la tête ». En complément l'ouvrage de HÉLÈNE TROCMÉ FABRE « **J'apprends donc je suis** » et la série de Vidéos « **Né pour apprendre** », produite avec les scientifiques, CYRULNIK B., NICOLESCU B., VARELA F., JACQUARD A., VINCENT J.D., SCHWARTZ B. sont une mine d'informations sur le besoin biologique vital de « l'apprendre », sur les techniques et sur les méthodes d'apprentissage en prise avec les connaissances actuelles.

Les travaux de HOWARD GARDNER sur les intelligences multiples et les liens avec le monde de l'éducation (Project Zero et Project Schools Using Multiple Intelligence Theory –SUMIT– de Harvard Graduate School of Education, Stanford Center for Innovations in Learning –SCIL–, en France « La main à la pâte » de CHARPAK) ont eu et ont aux Etats-Unis, puis en France, un profond impact sur les réflexions et les pratiques éducatives. Comme tout nouveau concept qui remet en cause l'idée dominante (le QI), il faudra quelques années pour diffuser dans le public l'importance de la variabilité des différentes stratégies d'apprentissage mises en œuvre par les apprenants.

Le site du gouvernement canadien⁷⁵ sur « Carrières et Emplois » fait une large présentation de ces stratégies d'apprentissage en fonction des 8 types d'intelligences :

Verbale/linguistique, Logique/mathématique, Visuelle/spatiale, Interpersonnelle, Intrapersonnelle, Corporelle/kinesthésique, Musicale, Naturaliste.

On pourra également consulter cet autre site canadien⁷⁶ « **Le cerveau à tout les niveaux** ». Ce site documenté par des spécialistes et en constante évolution, est un site didactique incontournable pour une approche de l'anatomie et les fonctionnements du cerveau. La présentation : texte, images, graphiques, résumés et liens hypertextes est un modèle pédagogique, et de plus, son accès est libre.

CONCLUSION

L'application des données nouvelles sur le fonctionnement du cerveau est une préoccupation « *es – SENS- tielle* », comme nous l'avons dit en introduction. Nous avons tenté de résumer celles qui, en ce qui nous concerne, nous avaient permis de changer nos *a priori*, nos croyances culturelles invalidantes pour notre propre motivation à faire progresser nos élèves. Nous aussi avons été élevées dans l'imaginaire culturel d'un cerveau achevé, aux potentialités tristement rigidifiées de naissance.

Concernant la transmission des acquis culturels et pour répondre succinctement aux trois questions posées en introduction nous dirons que :

Faciliter les apprentissages c'est avoir compris que chaque cerveau est différent, que chaque cerveau s'est nourri de ce qu'il a rencontré, que le fonctionnement culturel acquis a modelé individuellement chaque structure cérébrale qui de ce fait possède ses propres stratégies cognitives qu'il appartient au maître⁷⁷ de révéler et à l'élève de « **se** » découvrir et d'optimiser.

⁷⁵ <http://www.emploisetc.ca/> rechercher « Avoir un apprentissage effectif »

⁷⁶ <http://www.lecerveau.mcgill.ca/>

⁷⁷ Le véritable maître est un « passeur de vie ». ELISABETH ROLAND-GOSSELIN (2005) dans « *Passeurs, Antipasseurs, et nous...* », Le Manuscrit p.55, décrit ainsi ceux qui au contraire bloquent le passage vers l'autre rive, celle de la connaissance ou de la compréhension : les anti-passeurs.

« *Cerbères ou gardiens du seuil, ils bloquent, intimident, font douter de soi et des autres. Ils méprisent et abaissent, sèment le trouble et la confusion, négligent le présent au profit d'un avenir hypothétique, asservissent, accaparent, s'enferment et enferment les autres dans des rêves stériles, les empêchent de voir la richesse et la beauté du réel, ou au contraire les engluent dans un présent vide de projets, les arrêtant dans leur élan créateur* ».

Améliorer les transferts de connaissance c'est, connaissant le poids du contexte environnemental se donner les moyens d'agir structurellement sur ce contexte et faire en sorte que soit généralisée la culture, en remontant en amont, le plus en amont possible de chaque maillon du système éducatif pour identifier les valeurs institutionnelles qui président aux structures environnementales, lesquelles sont notre propre création, « **notre propre fait** » disait FRANÇOISE DOLTO.

Généraliser les transferts de connaissance c'est comme le sous-tend l'**Esprit** de la déclaration des droits de l'homme faire en sorte que l'individu ait droit à ce qu'existent des « **structures** » socio-économiques, que règnent des **conditions environnementales**, et une conjoncture, telles que le droit fondamental de l'homme, de tous les hommes, à l'accès à la connaissance et aux artefacts culturels, soit effectif.

Le travail sociologique effectué par BOURDIEU, fut de montrer que toute « structure » socio-économique institutionnalisée tend à se « reproduire », se maintenir, perdurer, et qu'elle s'organise et se ré-organise en permanence pour cela. Changer serait une question de thermodynamique biologique, un processus coûteux en énergie psychique, puisqu'il faut reconfigurer (connectique sous-tendue par toute une biochimie) des bases neuronales.

C'est sans doute pourquoi ce travail, reste pourtant « science morte ». La science évolue dans des « cadres mentaux » véhiculés par la pensée standard, donc correcte, en cours, cadres qui rendent à chaque époque certaines idées « pensables » ou « impensables » en terme de coût énergétique psychique social.

« *Il faut des dizaines d'années voire des siècles pour qu'un nouveau regard apporté par la science soit adopté par tous* » ALBERT JACQUARD.

Les périodes de crise permettent souvent cet élargissement de « vision ».

Notre époque a accumulé un nombre incroyable de données sur un fond de bruit encore indifférencié, Serions-nous à un tournant de l'impensable et d'un nouveau pensable?

Nous savons que la Vie nous incite biologiquement à rechercher un « monde meilleur », un environnement plus ajusté (optimiser notre survie et les conditions de celle-ci).

La conscience et le pragmatisme de survie à long terme devraient solliciter **l'ensemble de nos cerveaux** pour que se dégagent de nouvelles perspectives et que s'organisent des structures environnementales propres à l'épanouissement de tous et des potentialités de chacun.

Mieux connaître notre histoire cérébrale et notre propre construction psychique nous semble être une formidable promesse d'avenir afin que « *notre humanité ne se transforme pas en un société de termites de la pire espèce* » [KONRAD LORENZ & KARL POPPER, 1992], société pour laquelle disait ENSTEIN « il n'est nul besoin alors de posséder un cerveau une moelle épinière suffirait ».

L'impensable solidarité d'humanité culturelle se mettrait-elle en place?

Le rapport 2002 de l'OCDE « *Comprendre le cerveau, vers une nouvelle science de l'apprentissage* », nous semble un pas important vers ces objectifs avec une nouvelle interrogation cependant :

Pour l'humain de demain ou le demain des « actifs » de quelque minorité ?

Pour l'équilibre planétaire, c'est le défi que les générations à venir devront résoudre⁷⁸.

A nos enfants⁷⁹ A nos élèves

⁷⁸ Car si les inégalités sont « de nature », l'Humanité apparaît désormais « **Faits** de culture ».

L'équité pourrait être le « propre de l'homme » de conscience dont parlent les philosophes. Mais..., de nature, c'est à dire du simple fait de son histoire cérébrale, la liberté semble laissée à la discrétion de cette Humanité par le biais de l'environnement culturel qu'elle instaure, de son seul **Fait**.

⁷⁹ L'un de nos enfants dyslexique et surtout hyperactif ne possédait pas la lecture à l'issue de CP/CE1. Connaître l'architecture cérébrale, son développement évolutif, en comprendre la dynamique et le particularisme individuel nous a permis d'approcher le fonctionnement personnel de l'enfant et de remédier avec lui à son « inadéquation au monde scolaire ». Il est aujourd'hui en classe prépa scientifique sans retard scolaire, d'hyperactivité, plus de trace et ceci sans médicaments.

Références

- ASCHER PH., (2002), « Les signaux neuronaux », in *Université de tous les savoirs, le Cerveau, le Langage, le Sens*, O. Jacob, 59-73.
- BARUK S. (2001), Dossier « L'échec des maths à l'école », *Science et Vie*, n°1008, Septembre, 36-52.
- BLANC A., (1999), « Des mondes de réflexes », *Revue de l'APBG, Biologie-Géologie*, n°3, 541-544.
- BOWND S. M. D., (2001), « *La Biologie de l'Esprit, Origines et structures de l'esprit, du cerveau et de la conscience* », Masson Sciences, 322 pages.
- BREUER H., (2003), « Les neurones de la sympathie », *Cerveau et Psycho*, n°1, Mars-Juin, 41-41.
- CHANGEUX J. P. & CONNES A. (1989), « *Matière à pensée* », O. Jacob.
- CHANGEUX J. P. & RICOEUR P. (2000), « *Ce qui nous fait penser, La Nature et la Règle* », Poches O. Jacob, 336p.
- CHAPOUTIER G., (2003), « le 1% qui fait la différence », *Sciences et Avenir*, Oct-Nov 2003, p27.
- COTTRELL M. « Les réseaux de neurones : historique, méthodes et applications », Transparents, 142 pages, accessibles sur le site <http://samos.univ-paris1.fr>.
- DAMASIO A. R. (1994) « *L'erreur de Descartes, la raison des émotions* », Editions O. Jacob, 368 pages.
- DEHAENE S. (1997) « *La bosse des Maths* », O. Jacob, 299 pages.
- DEHAENE S. (1997), « Comment notre cerveau calcule-t-il ? », *Pour la Science*, n°236, juin 1997, p45-54.
- DEHAENE S. (2001), « Entretien avec STANISLAS DEHAENE : Qu'est ce qu'un nombre ? », *La Recherche* n°346, Octobre, 46-48.
- DEHAENE S., MOLKO N., WILSON A. (2004), « 1- Dyscalculie, le sens perdu des nombres, 2- Compter sur les doigts, une étape nécessaire », *La Recherche*, n°379, Octobre, 42-49.
- DEHAENE S., MOLKO N., COHEN L., WILSON A.J., (2004), « Arithmetic and the brain », *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 218-224.
- http://www.unicog.org/publications/Dehaene_ReviewNumber_CurrOpNeurobiol2004.pdf
- DONNARS O (2002), « Les mémoires bien gérées du prodige », *Les défis du CEA*, n°92, Juillet-Août 2002.
- DIAMOND J. (2000), « *Le troisième Chimpanzé, Essai sur l'évolution et l'avenir de l'animal humain* », Gallimard Essais, 700 pages.
- DORTIER J.F., (2001), « Les origines du langage », *Sciences Humaines*, n° 117, Juin, 40-41.
- DUNBAR R., (2001), « Le langage crée le lien social », *La Recherche*, Avril, 27-30.
- EDELMAN G. M. (1992) « *Biologie de la conscience* », Editions O. Jacob, 368 pages, édition originale en langue anglaise « *Bright air, Brilliant Fire : On the matter of Mind* », Basic Books, 1992.
- EDELMAN G. M. & TONONI G. (2000), « *Comment la matière devient conscience* », O. Jacob-Sciences, 316 p.
- EDELMAN G. M. (2004), « *Le Cerveau, Plus vaste que le ciel, Une nouvelle théorie générale du cerveau* », O. Jacob, 212 p.
- FIELDS D., (2005), « La force des Souvenirs », *Pour la Science*, n°335, Septembre 2005.
- GANDOLFO G., (2004), « *A quoi sert le cerveau? Petite synthèse des grandes fonctions cérébrales* », *Revue de l'APBG, Biologie-Géologie*, n°3, 513-545.
- GARDNER H. (1998), « *Les intelligences multiples* », Editions RETZ.
- GISIGER T., DEHAENE S., CHANGEUX J. P., (2000), « Computational models of association cortex », *Current Opinion in Neurobiology*, 2000, 10, 250-259.
- <http://www.pasteur.fr/recherche/unites/neubiomol/ARTICLES/Gisiger2000.pdf>
- GRANDIN T., (1997) « *Penser en Images* », Editions O. Jacob, <http://www.grandin.com/inc/book.html>
- HADAMARD J. (1952), « *Essai sur la Psychologie de l'invention dans le domaine mathématique* », série de cours en anglais, faits en 1943 à l'Ecole Libre des Hautes Etudes à New-York, traduit de l'anglais par JACQUELINE HADAMARD en 1952. Réimpression aux Editions JACQUES GABAY, 1993, dans la série des Grands Classiques Gauthiers-Villars, 153 pages. Cette réimpression reprend en fin d'ouvrage, la célèbre conférence de HENRI POINCARÉ « *L'Invention mathématique* », p137-151.
- HASBOUN D., Site de neuro-anatomie du CHU de la Pitié Salpêtrière, multimédias intégrant vidéos, textes et images synchronisés, « *L'Enseignement de la neuroanatomie par l'image* », <http://www.chups.jussieu.fr/ext/neuranat/>
- HERVÉ-MINVIELLE A., (2000), « Une mémoire ou des mémoires », *Découverte, Revue du Palais de la Découverte*, n°282, Novembre 2000, p31-41.
- HOUDÉ O. (2004), « Vers une pédagogie mieux adaptée », *Cerveau et Psycho*, n°3, 60-63.
- JACQUARD A., (1996), « *La matière et la vie* », Essentiels MILAN, 1996, 63 pages.
- JANSSENS J. P., (2004), « La fureur de vaincre », *Cerveau & Psycho*, n°2, 16-20.

- JEANNEROD M., (2004), « De la vision à l'imagination », *Sciences Humaines* ; Hors Série, n°43, Déc-Janv-Fév, 14-17.
- JOCHEN FRÖHLICH site sur les réseaux de neurones <http://rfhs8012.fh-regensburg.de/~saj39122/jfroehl/diplom/e-index.html>
- KARMILOFF-SMITH (2004), « Comment s'acquiert le Langage », *Revue Sciences Humaines, Hors Série, L'enfant Psychologie et Développement*, Juin-Août, 23.
- KARLI P., (2002), « Le cerveau des affects et des émotions », in *Université de tous les savoirs, le Cerveau, le Langage, le Sens*, O. Jacob, 97-111.
- KINDYNIS J., (2004), « L'autisme, un trouble du développement cérébral », *Revue de l'APBG, Biologie-Géologie*, 139-161.
- KÜHNEN U. (2003), « Penser à la chinoise », *Cerveau & Psycho*, Nov, 12-15.
- LAROCHE S., (2001), « Les mécanismes de la mémoire », *Pour La Science, Dossier Hors série, « La mémoire, le jardin de la pensée »*, Avril-Juillet, 52-59.
- LE GUEN M. (1997), « Apport de l'imagerie au traitement cognitif de l'information. Points de vue, selon les Sciences Cognitives, selon des Mathématiciens, selon des Statisticiens », Ecole Européenne EDA, Carcassonne, Septembre 1997.
- LE GUEN M., (1999), « De l'importance de l'image », *Courrier des Statistiques*, n°90, juin, INSEE, 7-10, <http://matisse.univ-paris1.fr/leguen/leguen1999e.pdf>
- LE GUEN M., (1999), « Enseignement de la Statistique, Voir, Apprendre, Comprendre Autrement », *Courrier des Statistiques*, n°90, juin 1999, INSEE, pp37-38, <http://matisse.univ-paris1.fr/leguen/leguen1999d.pdf>
- LENER C. (2003), « Acalculies, Un examen rapide (mais réfléchi) du calcul », *Revue Neurologie*, Mai, Vol. 6.
- LORENZ K. & POPPER K. (1992), « *L'avenir est ouvert* », Flammarion, 174 pages.
- MALSON L., (2001), « *Les enfants sauvages* », Bibliothèque 10-18, 250 pages.
- MONTESORI M., (1948), « *Eduquer le potentiel humain* » traduit en français en 2003 chez Desclee De Brouwer, 155 pages.
- NELSON P.G., (2003), « Un tissu de plus en plus excitable », *Science et Vie*, n°210, Mars, 81-86.
- PAUEN S., (2003), « La pensée sans les mots », *Cerveau & Psycho*, n°3, Sept-Nov 2003, pages 38-43.
- PERRUCHET P. & PEEREMAN R., (2005), « Apprendre sa langue maternelle : une question de statistique », *Pour la Science*, n°327, Janvier, 82-87.
- POINCARÉ H. (1908), « *L'Invention Mathématique* », conférence publiée dans le Bulletin de l'Institut Général Psychologique, 8^{ème} année, n°3, mai-juin 1908, p.175-187. Réimpression aux Editions JACQUES GABAY, 1993, dans la série des Grands Classiques Gauthiers-Villars, cf. l'annexe II de HADAMARD.
- POTIER B., BILLARD J. M., DUTAR P. (2001), « Hippocampe et mémoire », *Pour La Science, Hors Série*, Avril-Juillet, 14-21.
- PROCHIANTZ A (2000), « *Machine-esprit* », Odile Jacob-Sciences, 215 pages.
- RENAULT B (2005), «Le cerveau magnétique en images.», *Pour La Science, Dossier Hors série, « La nouvelle imagerie jardin médicale, Le corps transparent »*, Décembre, 56-61.
- ROSE S. (1992), « *La mémoire, des molécules à l'esprit* », Seuil, 1992
- ROLAND-GOSSELIN E (2005), «*Passeurs, Antipasseurs, et nous...*», Le Manuscrit 86 p.
- SIRIGU A. LAFARGUE G., (2004), « La volonté d'agir est-elle libre ? », *Cerveau & Psycho*, n°6, 78-83.
- SHULZ D., (2000), « Mémorisation et rappel, le poids du contexte interne », *Science & Vie, Hors Série « Les performances de la mémoire humaine »*, n°212, 52-56.
- TOMASELLO M. (2004), « *Aux origines de la cognition humaine* », RETZ, 2004.
- TROCME-FABRE H. (1997) « *J'apprends donc je suis* », Editions Organisations, 285 pages.
- VENS-WAGNER G., (2000), « *Les enjeux qualitatifs de l'école* », Note du 8/2/2000, Commission européenne, cabinet de VIVIANE REDIG, Réf : Bruxelles CMI/JY D 2000.
- VENS.WAGNER G., (2000), Réponse à X. DARCOS, « L'école, qu'en est-il du BESOIN de culture ? », Note du 13/11/2000, Réf : Sénat XD/RO/3120.
- VENS-WAGNER G., (2003), « Les différents niveaux d'intégration et d'intériorisation de l'environnement par le cerveau, Connaissance-Action », Note du 29/12/2003, 6/3/2004, Rapport à la commission THELOT (débat national sur l'avenir de l'école), Réf : Commission CT/AD/N° 570.

Revues et Rapport

- Cerveau & Psycho*, (2003, 2004), n°1-n°8, Mars 2003 à Décembre 2004.
- La Recherche* (1994), « La mémoire », Hors Série, n°267, Juillet-Août 1994.
- La Recherche* (1996), « Biologistes de la conscience » n°287, Mai 1996.
- La Recherche* (1996), « Voir dans le Cerveau » Hors Série, n°289, Juillet-Août 1996.

Pour La Science (1998), « L'Intelligence », n° Spécial, Décembre 1998.
 Pour La Science (2001), « *La mémoire, le jardin de la pensée* », Hors Série, Avril-Juillet 2001.
 Pour La Science (2000), « Les génies de la Science : POINCARÉ. », n°4 Aout-Novembre 2000.
 Sciences Humaines, (2000), « Le changement de l'individu aux sociétés », Hors Série, n°28, Mars-Mai 2000.
 Sciences Humaines, (2002), « Les Sciences de la cognition », Hors Série, n°35, Décembre 2001-Février 2002.
 Sciences Humaines, (2004), « Le Monde de l'image », Hors Série, n°43, Janvier-Février 2004.
 Sciences Humaines, (2000), « Le changement de l'individu aux sociétés », Hors Série, n°28, Mars-Mai 2000.
 Sciences & Avenir, (1998), « L'intelligence », Décembre 1998.
 Sciences & Avenir, (1999), « Lire dans l'inconscient », Septembre 1999.
 Science & Vie (2000), « La vie au tout début », n°210, Mars 2000.
 Science & Vie, (2000), « Les performances de la mémoire humaine », Hors Série, n°212.

Rapport de l'OCDE (2002), « Comprendre le cerveau, vers une nouvelle science de l'apprentissage », Les Editions de l'OCDE, 125 p, <http://www1.oecd.org/publications/e-book/9102022E.PDF>

Film et Vidéos

EDELMANN C., « Un violon dans la tête », primé à plusieurs festivals de films scientifiques.

TROCMÉ -FABRE H., Vidéogramme en 7 cassettes « *Né pour apprendre* », coproduction Université de la Rochelle & École Normale Supérieure de Fontenay-Saint-Cloud :

- Né pour découvrir (CYRULNIK B., étho-psychiatre) ;
- Né pour reconnaître les lois de la vie (NICOLESCU B., physicien théoricien);
- Né pour organiser (VARELA F., biologiste);
- Né pour créer du sens (VARELA F.) ;
- Né pour choisir (JACQUARD A., généticien et mathématicien et de Peretti A., psychosociologue);
- Né pour innover (VINCENT J.-D., neuro-endocrinologue);
- Né pour échanger (SCHWARTZ B., insertion professionnelle des jeunes).

Site Internet, « *Le cerveau à tous les niveaux* », <http://www.lecerveau.mcgill.ca/>

Citations

« *Il faut élever les enfants, non pas, en fonction du monde tel qu'il est, mais en fonction d'un état meilleur possible* ».

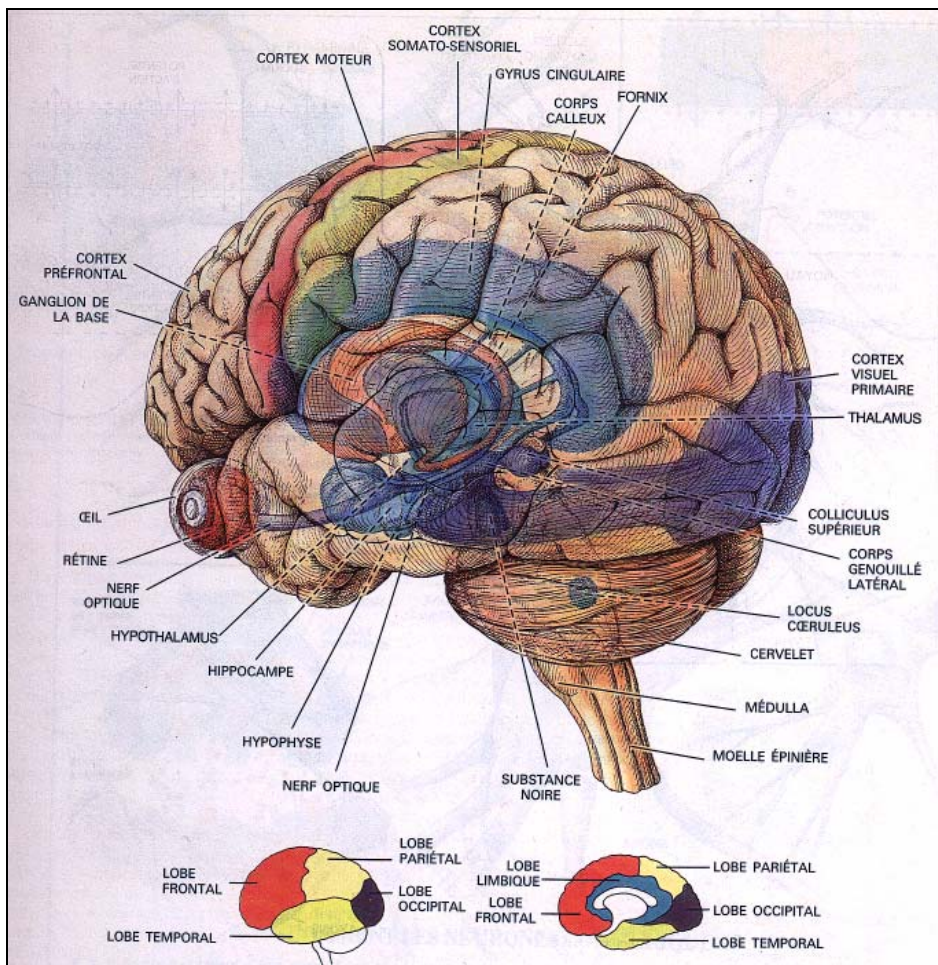
KANT (1785) - Fondement de la métaphysique des mœurs –

« *Il en est des livres comme du feu dans nos foyers,
 On va prendre le feu chez son voisin,
 On l'allume chez soi,
 On le communique à d'autres
 Et il appartient à tout le monde* »

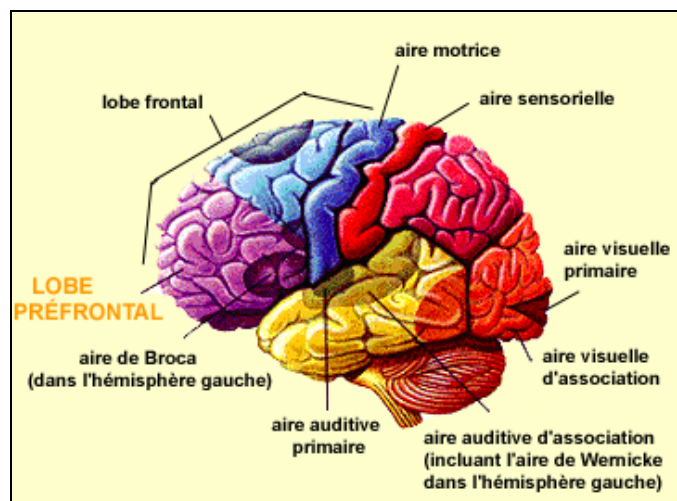
VOLTAIRE



Annexe Schémas du cerveau



© Pour la Science, n° 181, nov 1992, p. 31.
Illustration de Carol Donner, Tucson, Arizona



Source : http://www.lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_07/d_07_cr/d_07_cr_tra/d_07_cr_tra.html