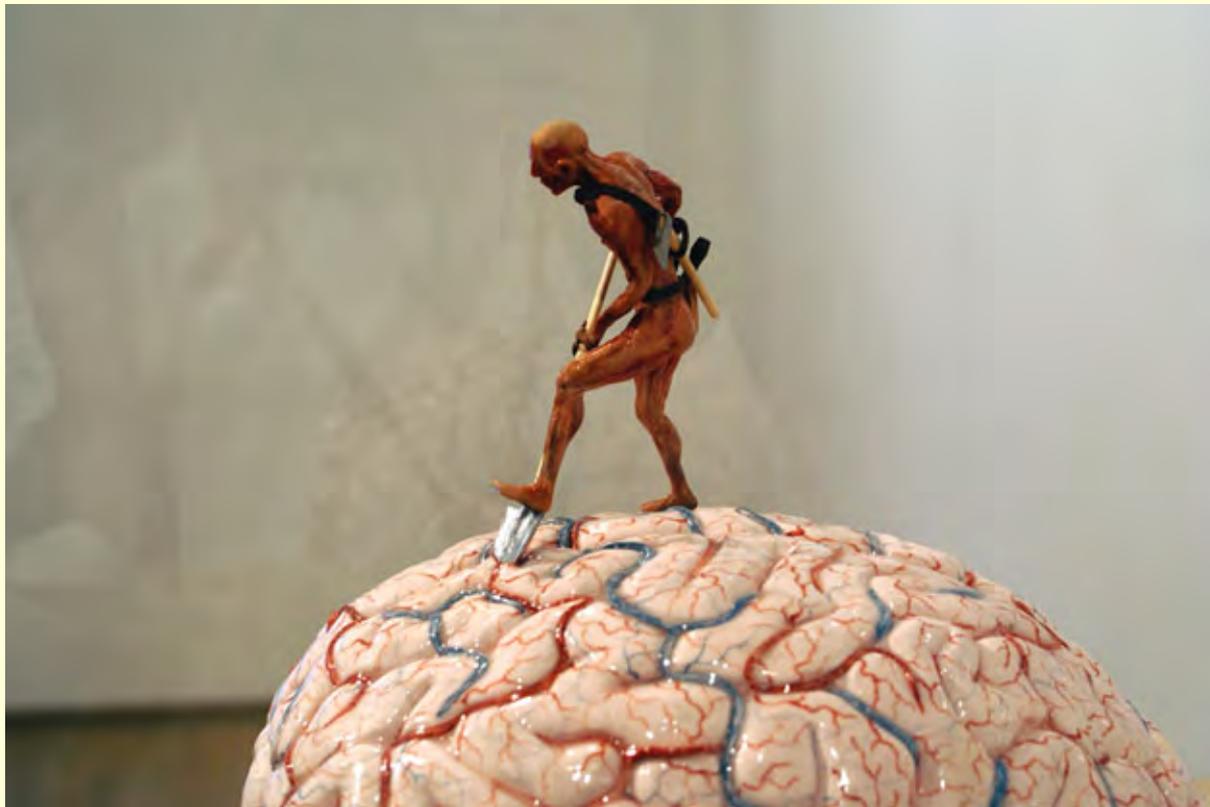


# École des profs



1<sup>er</sup> juin 2016



## 1<sup>ÈRE</sup> HEURE : Notre histoire

Survol des science cognitives depuis un siècles

Big History et évolution biologique

Neurobio 101

## 2<sup>È</sup> HEURE : L'objet cerveau

Anatomie de notre connectome à différentes échelles

Activité endogène dynamique dans les réseaux cérébraux

Comment sortir de la phrénologie

DÎNER

## 3<sup>È</sup> HEURE : La cognition incarnée

La cognition implique le corps

La cognition implique l'environnement

La cognition est énéactée

## 4<sup>È</sup> HEURE : Concepts et modèles

Quelques fonctions dites « supérieures »

Prise décision, inconscient et conscience

Codage prédictif (« predictive processing »)

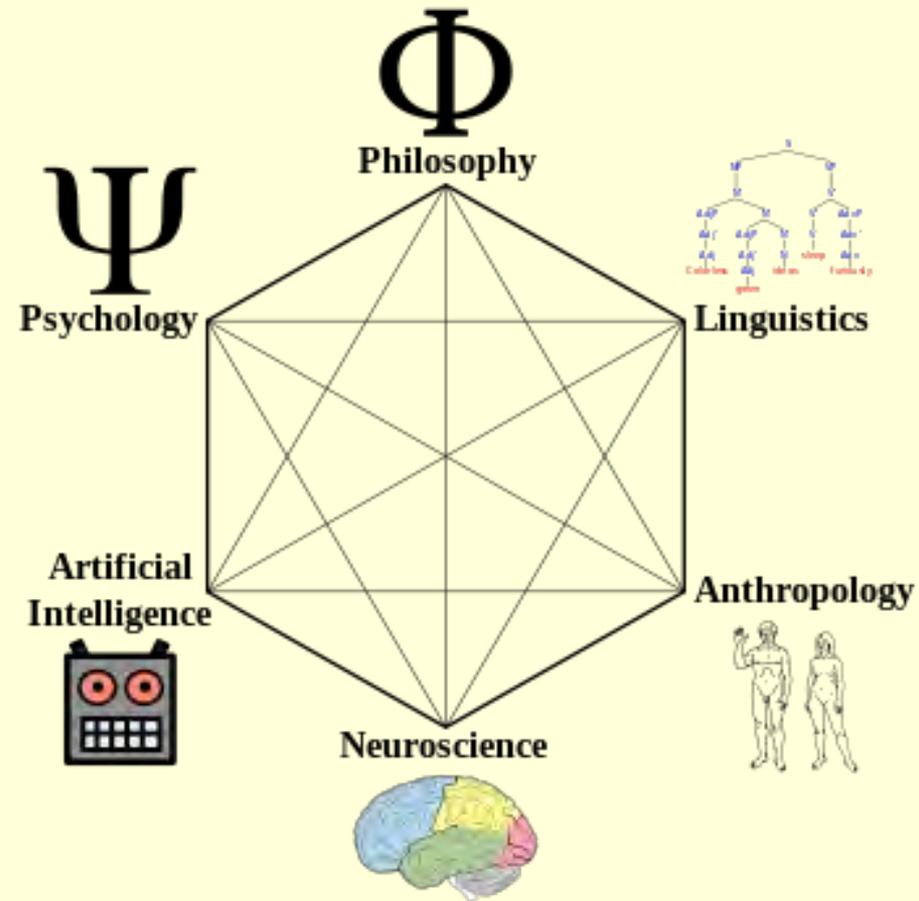
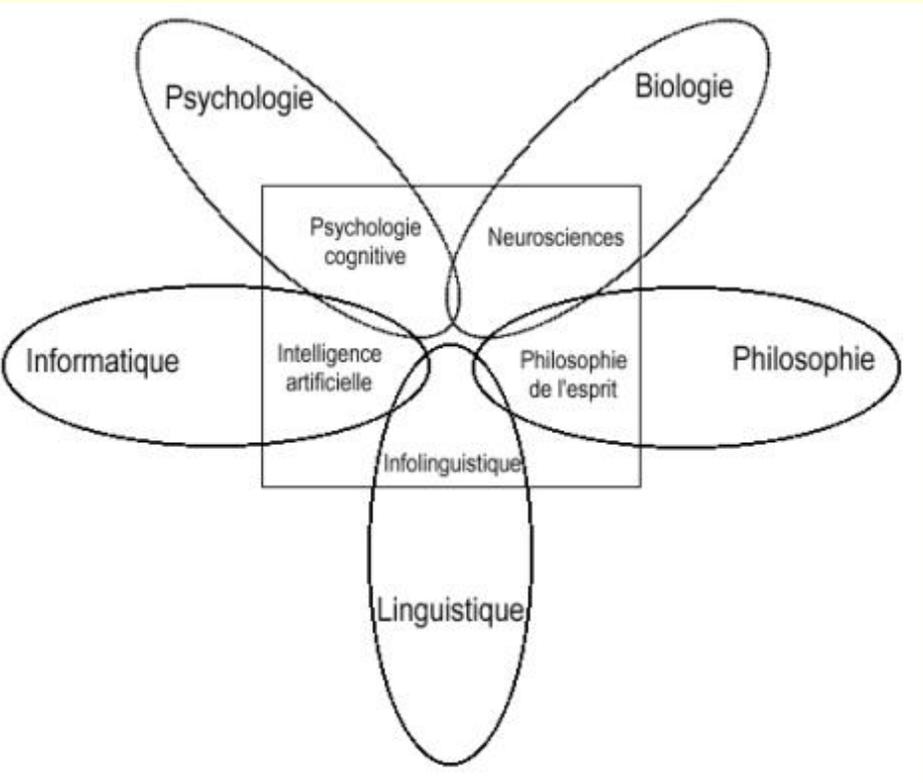
## **Survol des sciences cognitives depuis un siècle**

- Où l'on va passer en revue différents paradigmes qui tentent depuis un siècle de saisir le rapport cerveau - pensée

## **Big History et évolution biologique**

## **Neurobio 101**

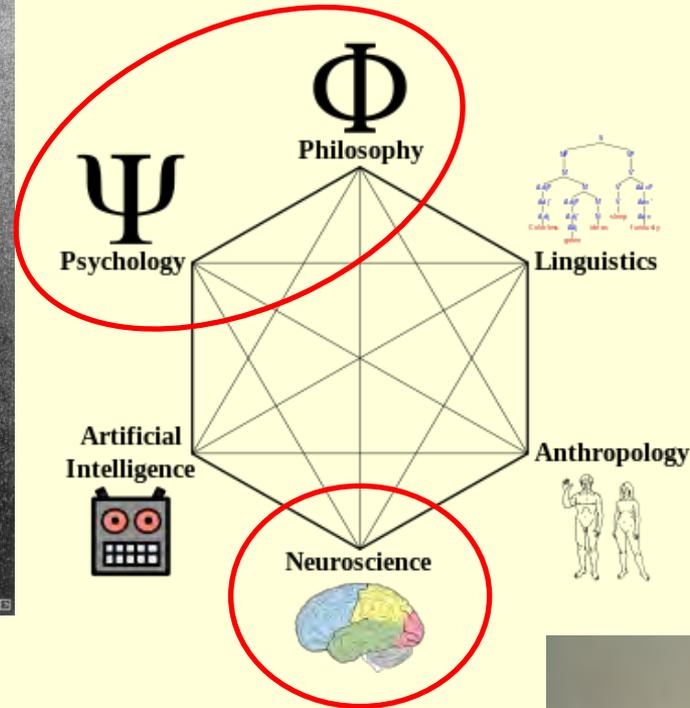
Les sciences cognitives telles qu'on les connaît aujourd'hui sont nées peu après le milieu du XXe siècle...



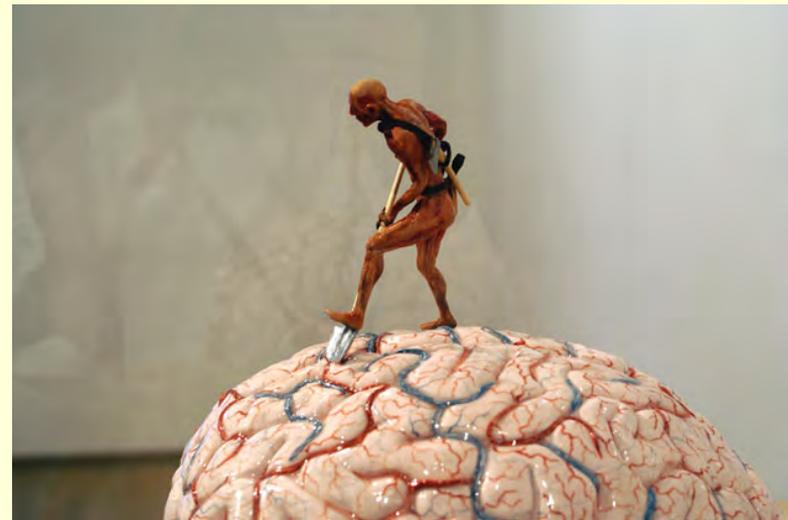
...lorsque différentes disciplines s'intéressant toutes à l'esprit humain (« mind ») se sont mises à **dialoguer**.



Approche « subjective »  
ou à la 1<sup>ère</sup> personne



Approche « objective »  
ou à la 3<sup>e</sup> personne



Plusieurs **grandes théories** ou « **paradigmes** » se sont succédés (et « superposés »...) depuis un siècle pour tenter d'expliquer ce rapport entre la 1<sup>ère</sup> et la 3<sup>e</sup> personne, entre pensée et cerveau...

...et ont des noms charmants (!) comme :

- Structuralisme
- Behaviorisme
- Cognitivism
- Connexionnisme
- Cognition incarnée

On va les passer en revue très rapidement les uns après les autres...

XIX<sup>e</sup> et début du XX<sup>e</sup> siècle :

La tradition du structuralisme en psychologie

qui utilise l'introspection pour tenter de décrire les composantes élémentaires de l'esprit humain.



Le groupe de recherche de Wilhelm Wundt en 1880.

Une perception sensorielle reposait par exemple pour eux sur la structure des associations qu'on pouvait faire entre de nombreuses sensations (d'où le nom de “structuralisme”).

Cette approche fut critiquée pour la difficulté de vérifier expérimentalement ces démarches introspectives qui était très variables d'un laboratoire à l'autre.

À partir des années 1920...

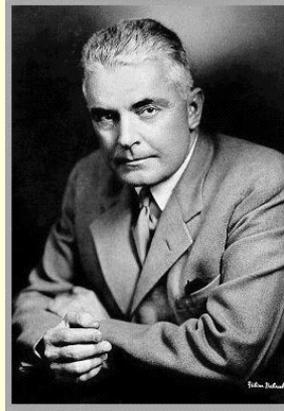
## Behaviorisme



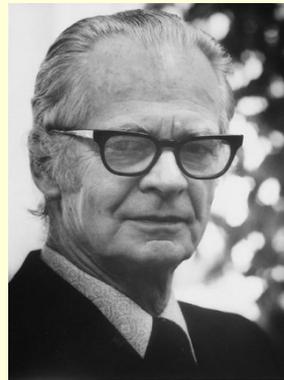
Cerveau = "boîte noire" = ce qui s'y passe est, par nature, méthodologiquement inaccessible et inobservable.

On s'intéresse donc seulement aux **stimuli** qui s'exercent sur l'organisme et les **réponses** que donne cet organisme.

Centré sur l'influence de l'environnement sur nos processus mentaux.



J. B. Watson



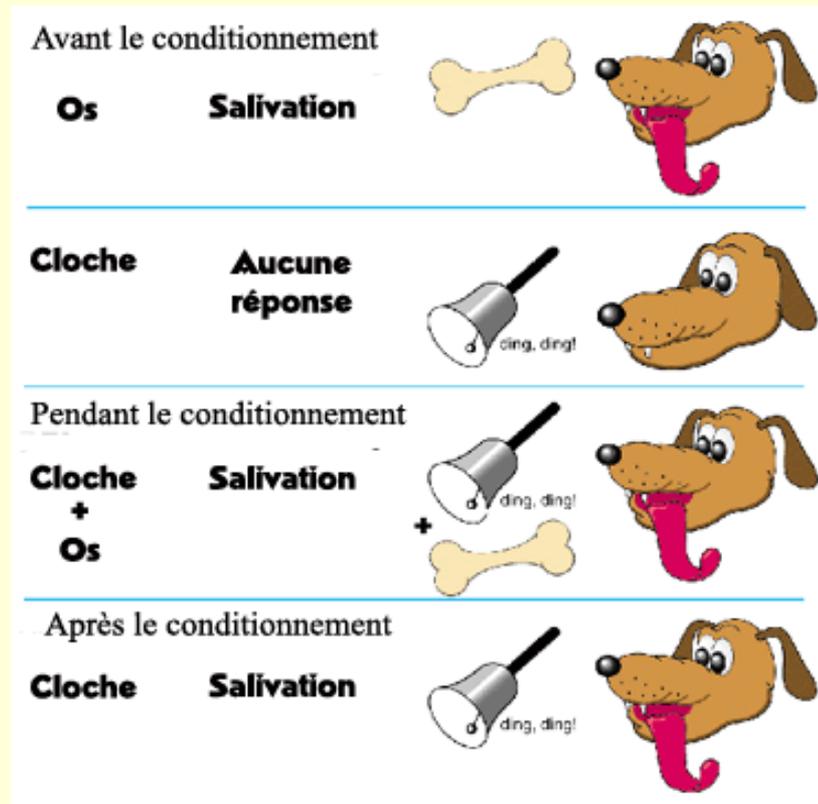
B.F. Skinner

# Conditionnement classique



Ivan Pavlov

Par conséquent, un de leur **champ de recherche favori** était **l'apprentissage associatif**.

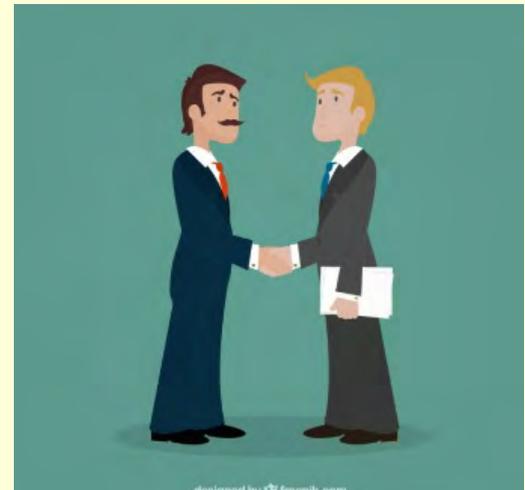


Bref, les behavioristes refusèrent toute spéculation sur des états mentaux et bannirent des sujets d'étude comme **la pensée, l'esprit, la conscience ou l'imagination**, et des constructions hypothétiques comme **les symboles, les idées ou les schémas**.

Ça fait beaucoup dans la poubelle...

D'où cette blague de ses détracteurs qui faisaient remarquer qu'un behavioriste qui en rencontre un autre n'aurait pas d'autres choix que de lui dire :

« Vous semblez aller bien aujourd'hui !  
Et moi, comment vais-je ? »...



Un peu plus tard, vers le milieu du XX<sup>e</sup> siècle se développe la **linguistique**, discipline scientifique consacré à l'une de nos capacités mentales les plus sophistiquées, **le langage**.

Une des critiques les plus sévères du béhaviorisme va venir du linguiste **Noam Chomsky** qui, en **1959**, affirme que « vouloir étendre le modèle béhavioriste de l'apprentissage à la linguistique est **sans espoir**. »

Pour lui, nos compétences linguistiques ne peuvent être expliquées sans admettre que les êtres humains possèdent un répertoire important de **structures cognitives complexes** qui président à l'usage du langage.



## Cognitivism

Domine les sciences cognitives du milieu des années 1950 aux années 1980.



Considère à nouveau l'esprit qu'il compare à un ordinateur.

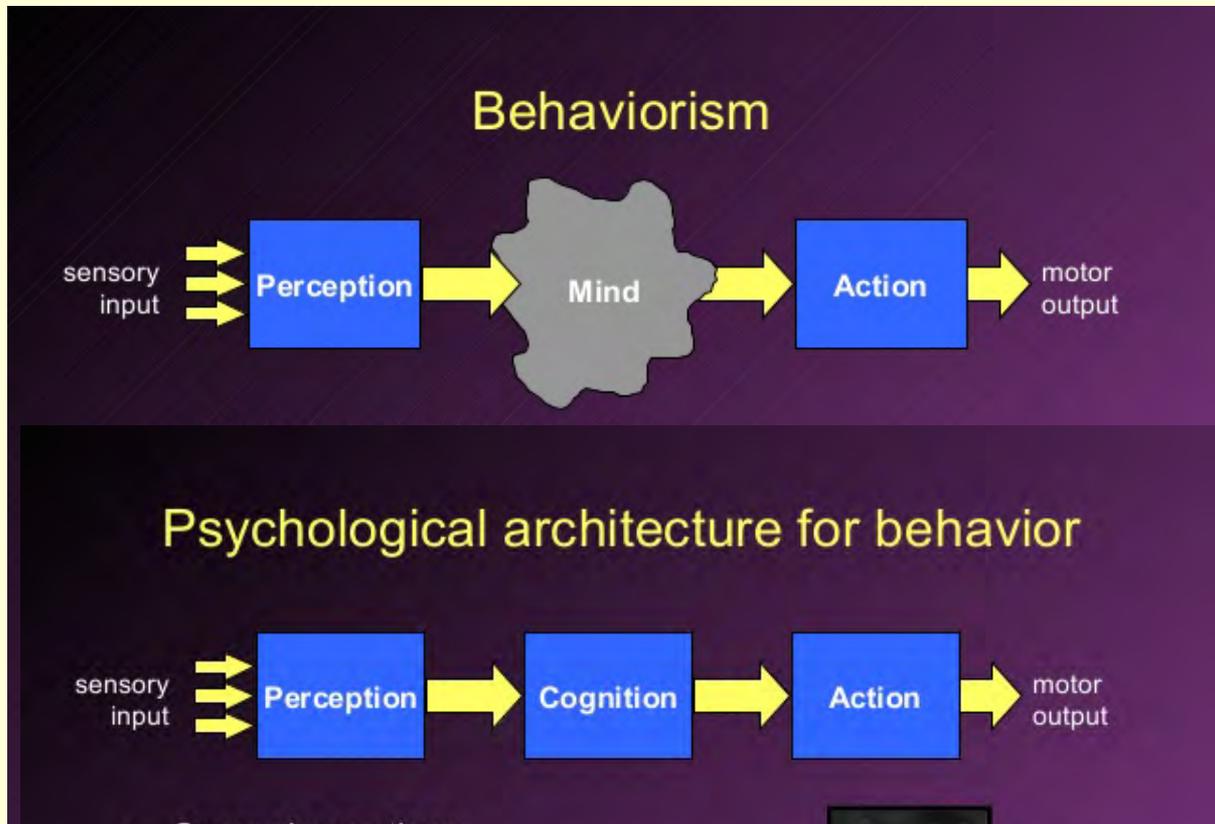
Ici, la cognition c'est le traitement de l'information :

la **manipulation de symbole** à partir de règles.

Autrement dit, ce qui fonde encore plus ou moins explicitement ce paradigme dominant des sciences cognitives, c'est encore le **vieux schéma cartésien** « perception → esprit → action ».

À la différence près que, comme l'esprit n'a plus la cote depuis le behaviorisme c'est la « cognition » qui l'a remplacé dans le même schéma.

[ merci à Paul Cisek pour les diapos suivantes en mauve... ]



(Source de cette diapo, et de toutes celles qui suivent sur fond mauve : <http://www.slideshare.net/BrainMoleculeMarketing/uqam2012-cisek> )

Ce modèle repose aussi sur un postulat explicitement défendu, à savoir que **la nature du substrat physique qui permet la cognition importe peu.**

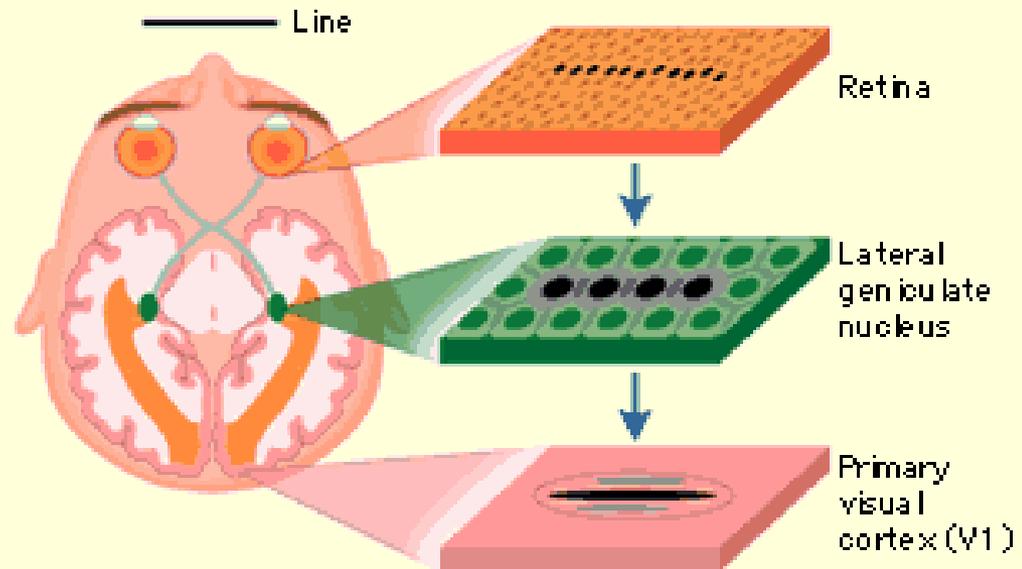
Dans le jargon des sciences cognitives, c'est la thèse fonctionnaliste dite « **de réalisation multiple** » inspirée directement de la métaphore avec l'ordinateur où le cerveau serait le « hardware » et la cognition le « software ».



Une autre notion qui dérive de ce modèle « dualiste » qui ne dit pas son nom est celle de **représentation**.

Cette notion peut prendre plusieurs sens dans les débats techniques en sciences cognitives, mais elle renvoie à l'idée qu'avec un certain code, **l'activité nerveuse représente d'une certaine façon le monde extérieur** (dont on considère implicitement qu'il est le même pour tous, autre postulat sujet à débat !).

L'idée de représentation s'accorde aussi très bien avec une autre, celle d'une **décomposition** possible des comportements **en plus petites unités**. Ainsi, au niveau de la perception visuelle par exemple, on dira que l'aire visuelle primaire V1 représente ou « code pour » des lignes avec une certaine orientation dans le champ visuel.



## L'assurance tranquille du paradigme dominant... ;-)

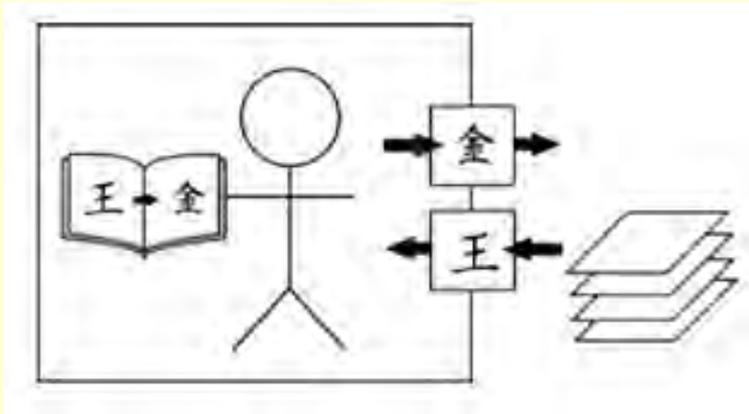
Durant l'âge d'or du cognitivisme dans les **années 1970**, les cognitivistes aimaient à dire que leur approche était "the only game in town" (Fodor 1975, 1981).



Mais éventuellement, les **problèmes** et **limites** s'accumulent...

Par exemple, à partir des **années 1980**, le philosophe **John Searle**, développe une série d'arguments pour démontrer que **l'ordinateur ne pense pas car il n'a pas accès au sens.**

**L'argument de la « chambre chinoise » :**  
une machine ne fait que manipuler des symboles abstraits,  
**sans en comprendre la signification.**



Elle peut traduire mot à mot un texte dans deux langues étrangères si elle dispose d'un dictionnaire de correspondances.

Mais ne comprenant pas le sens des mots utilisés : comment choisir entre « *weather* » ou « *time* » pour traduire le mot français « temps », si on n'a pas accès à son sens ?

→ le « problème de l'ancrage des significations »

25e Conférence internationale World Wide Web

## Deux visions pour rendre le Web plus «intelligent»

13 avril 2016 | Petko Valtchev et Roger Nkambou - *Professeurs au Département d'informatique de l'UQAM*

<http://www.ledevoir.com/societe/medias/467947/conference-internationale-world-wide-web-deux-visions-pour-rendre-le-web-plus-intelligent>

Il est maintenant acquis que pour éviter les pièges de la langue, les applications Web doivent avoir **un accès ne serait-ce que partiel aux significations des documents**, soit leur sémantique.

Cependant, si cet objectif ne fait pas de doute, les opinions quant à la façon d'y arriver divergent. En réalité, **deux grandes visions ont émergé.**

**Vision « structuraliste » (Tim Berners-Lee )** : les données mentionnées (Obama, Trudeau, Canada, etc.) sont étiquetées, puis reliées entre elles dans un réseau à l'échelle du globe

**Vision « holistique » (Peter Norvig)** : exploiter l'apprentissage machine et l'effet *big data* des documents Web (extraire des statistiques fiables sur les suites de mots)

## Vers le connexionnisme...

Le cognitivisme voulait aussi simuler les performances d'un expert humain adulte.

Mais comme il ne réussissait bien qu'à résoudre que des tâches plus circonscrites et locales (l'exemple du jeu d'échecs...),



## Vers le connexionnisme...

Le cognitivisme voulait aussi simuler les performances d'un expert humain adulte.

Mais comme il ne réussissait bien qu'à résoudre que des tâches plus circonscrites et locales (l'exemple du jeu d'échecs...),

une conviction s'est développée : la forme **d'intelligence** la plus fondamentale n'est peut-être pas celle de l'expert, mais bien celle d'un... **bébé !**

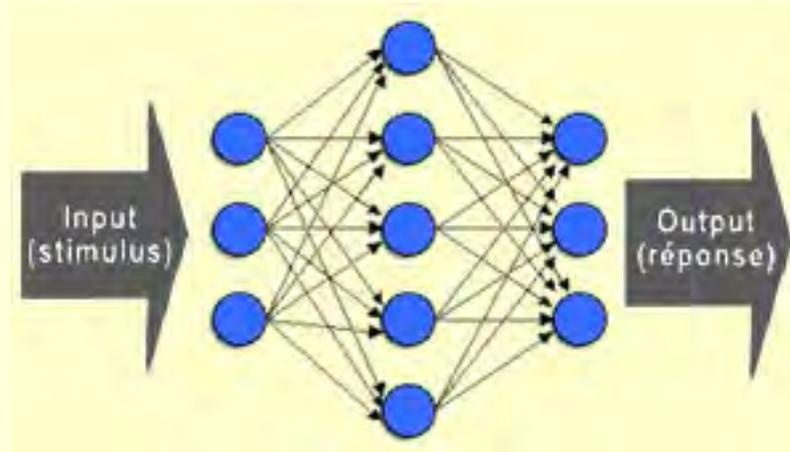
Car un bébé peut acquérir le langage et constituer des objets signifiants à partir de ce qui semble être une masse informe de stimuli.

Il fallait donc chercher plutôt à simuler l'intelligence du bébé qui apprend.



## Connexionnisme

Commence à remettre en question l'orthodoxie du cognitivisme au début des années 1980.



Il prend en compte le **cerveau** et essaie de comprendre la cognition avec des réseaux de neurones.

Plus une affaire **d'entraînement** que de programmation.

La cognition émerge d'états globaux dans un réseau de composants simples.

En parallèle, juste avant, dans les années 1970, **James J. Gibson** développe son **approche écologique** de la perception visuelle qui est aujourd'hui considérés comme l'autre champ de recherche qui remet en question le cognitivisme et tout le traitement de symbolique abstrait qui vient avec.



Son aphorisme "Ask not what's inside your head, but what your head's inside of" renvoie à l'importance qu'il accorde à **l'environnement** ou la **niche écologique** d'un organisme.

Car pour Gibson ce ne sont pas tant les sensations en provenance des objets qui importent, mais les possibilités d'action, ou "**affordances**", que suggèrent à un organisme donné tel ou tel objet ou aspect de son environnement.

# Affordance



Source: [raftfurniture.co.uk](http://raftfurniture.co.uk)

Source: [blackrocktools.com](http://blackrocktools.com)

Affordance refers to the **actual** and **perceived** attributes of a product or process that suggest its uses

Design for ALL

50



Gibson

Bruce



Environment

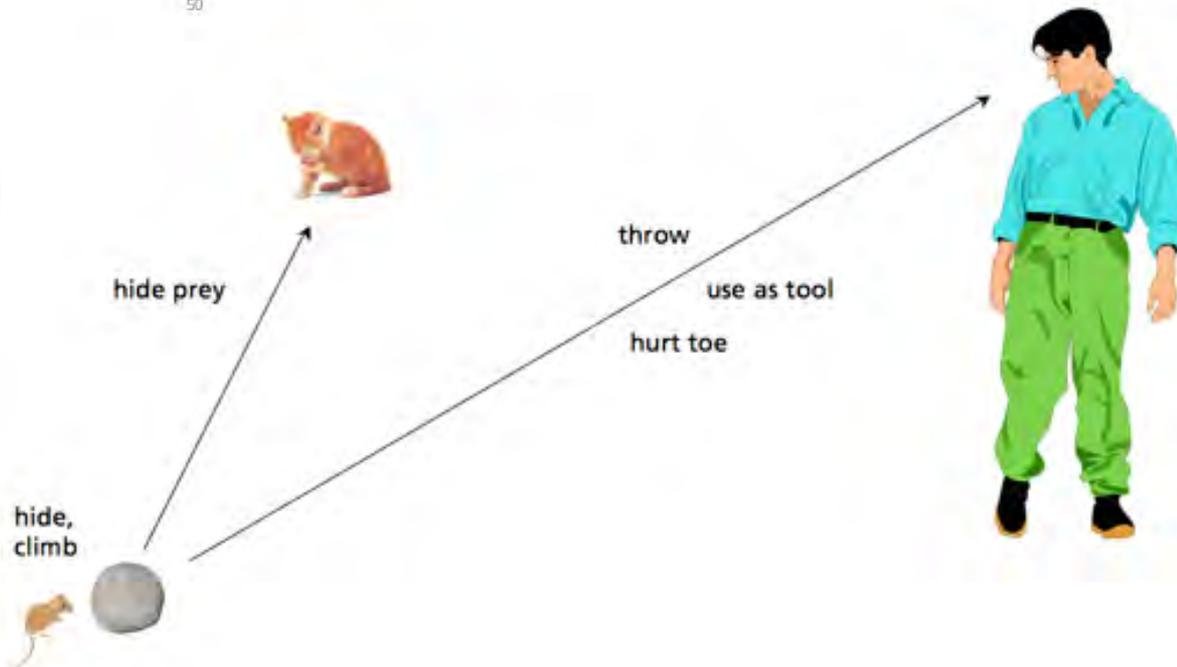


Nutrition

Housing



Figure 5: Tree affordance to bird, person, monkey, and squirrel



## Pour Gibson :

- un organisme et son environnement sont donc **inséparables**;
- beaucoup de ce que fait l'être humain avec sa technologie et ses connaissances transmises culturellement est de créer **davantage affordances** que dans un environnement naturel (exemple : ce qu'on fait en camping, escalier dans pente trop abrupte, etc.);
- il y a donc aussi des **affordances culturelles** : notre comportement dépend souvent de ce que l'on perçoit des intentions des autres.
- Gibson disait : "**behavior affords behavior**". Dans le sens où si quelqu'un est gentil avec vous, cela vous porte à être gentil aussi.

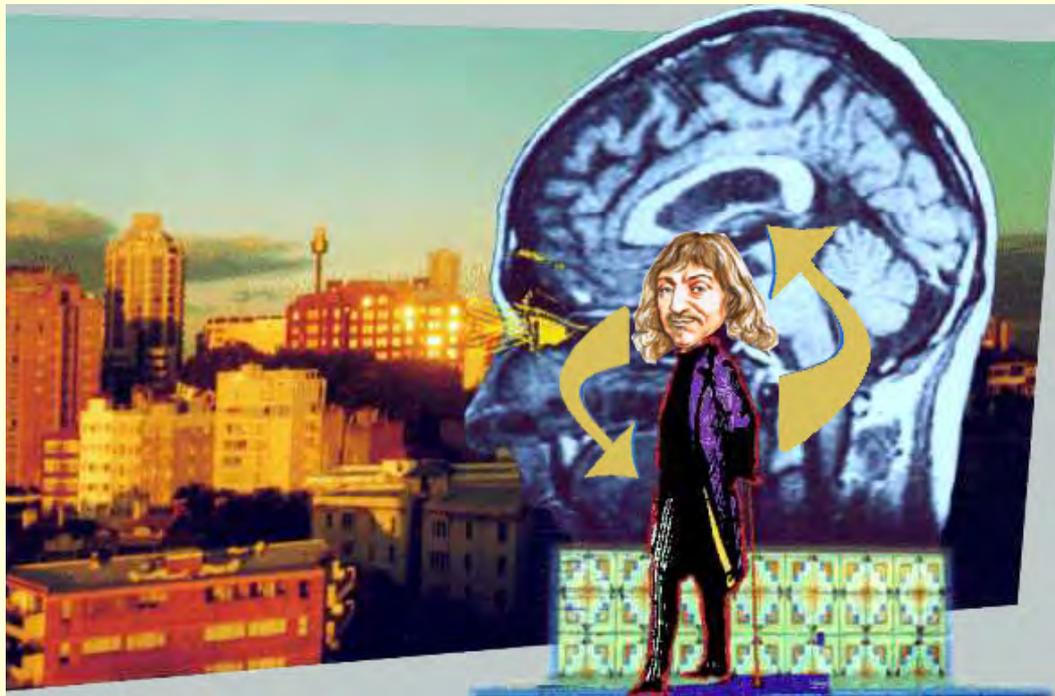
D'autres, comme **Francisco Varela**, vont insister sur la notion de « **couplage** » sensori-moteur avec un environnement qui va venir simplement « **perturber** » une activité nerveuse **endogène et dynamique** toujours présente.

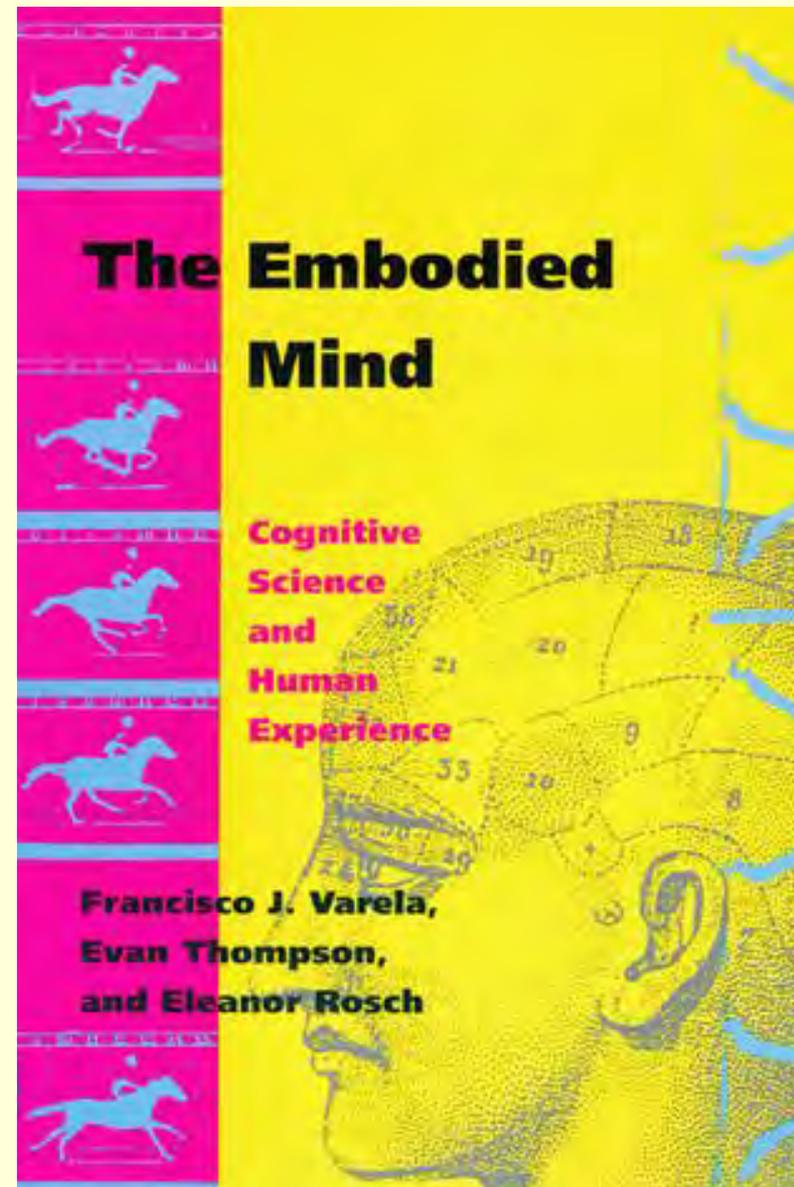
## Systemes dynamiques incarnés

À partir du début des années 1990,

les **systemes dynamiques incarnés** vont critiquer  
le cognitivisme **et** le connexionnisme

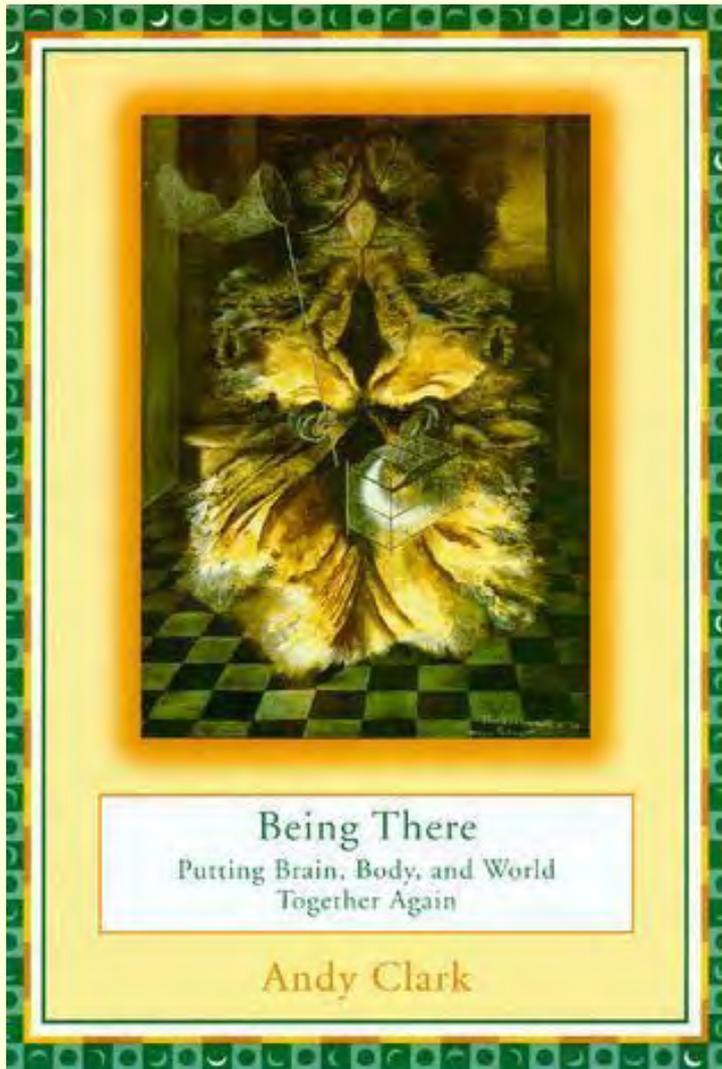
Ils vont prendre en compte non seulement le cerveau, mais le **corps**  
particulier d'un organisme et l'environnement dans lequel il évolue.



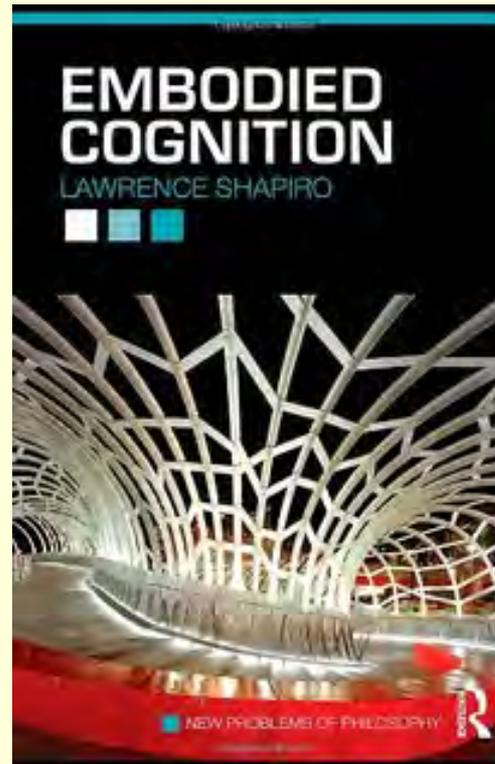


1991

1996



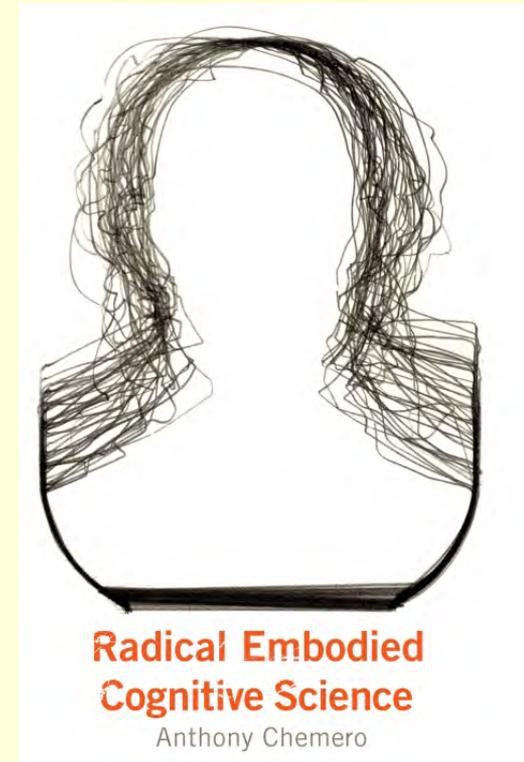
2011



**'Embodied Cognition',  
by Lawrence Shapiro**

<http://psychsciencenotes.blogspot.ca/2012/07/embodied-cognition-by-lawrence-shapiro.html>

2011



# CONSCIOUSNESS EXPLAINED



DANIEL C. DENNETT  
Author of *Brainstorms* and coauthor of *The Mind's Eye*

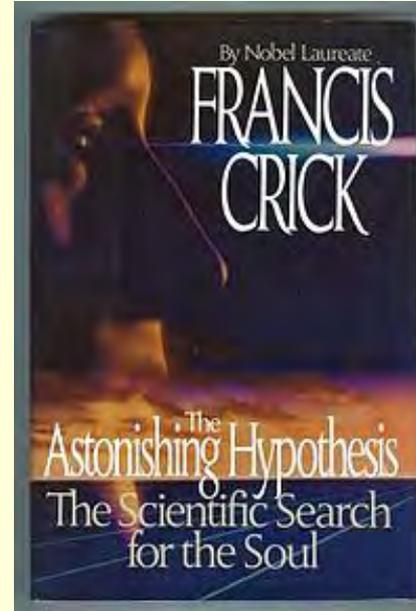
1991

GERALD M. EDELMAN

BIOLOGIE DE LA  
CONSCIENCE



1992



1994

The  
Conscious  
Mind

In Search

of a

Fundamental

Theory

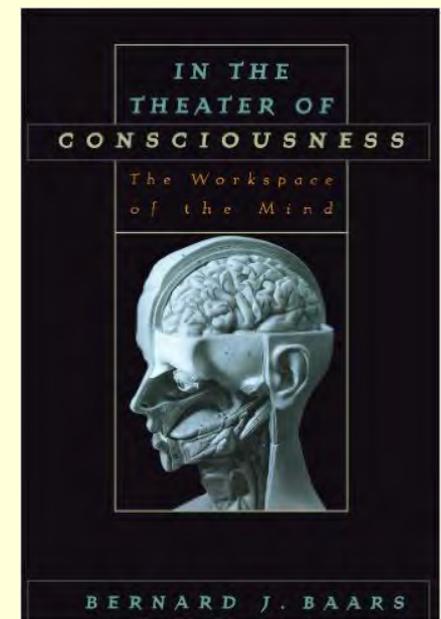
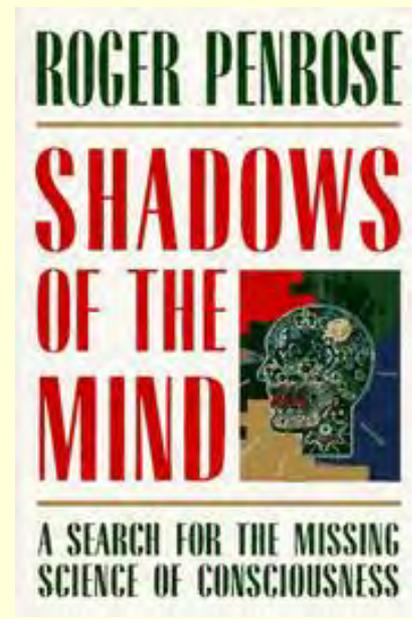
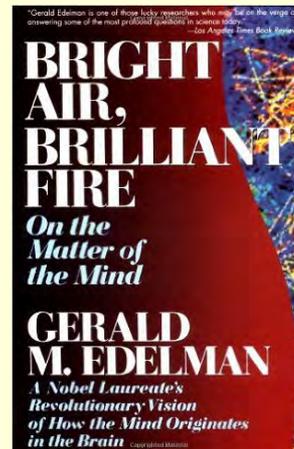
DAVID J. CHALMERS

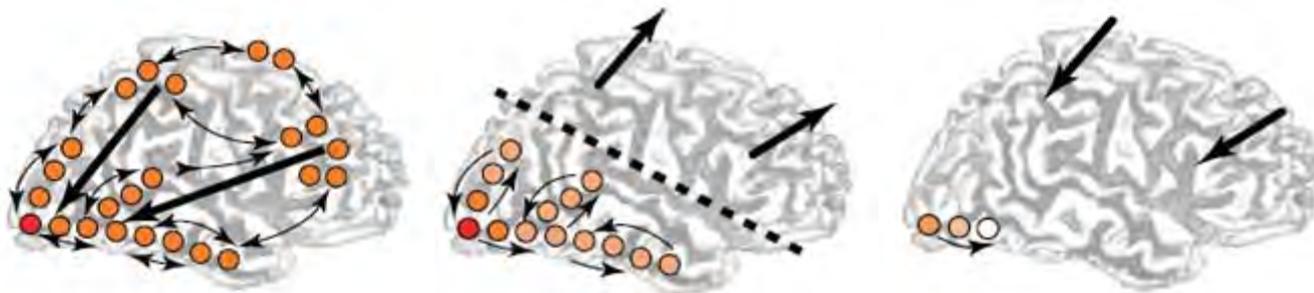
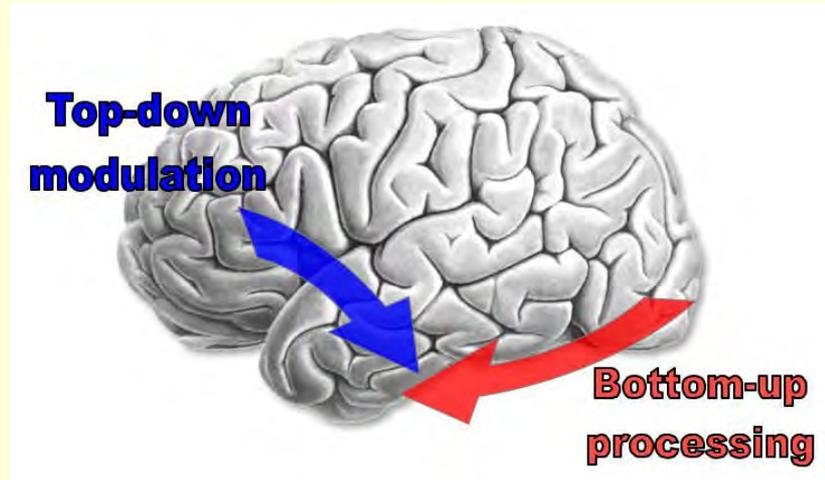
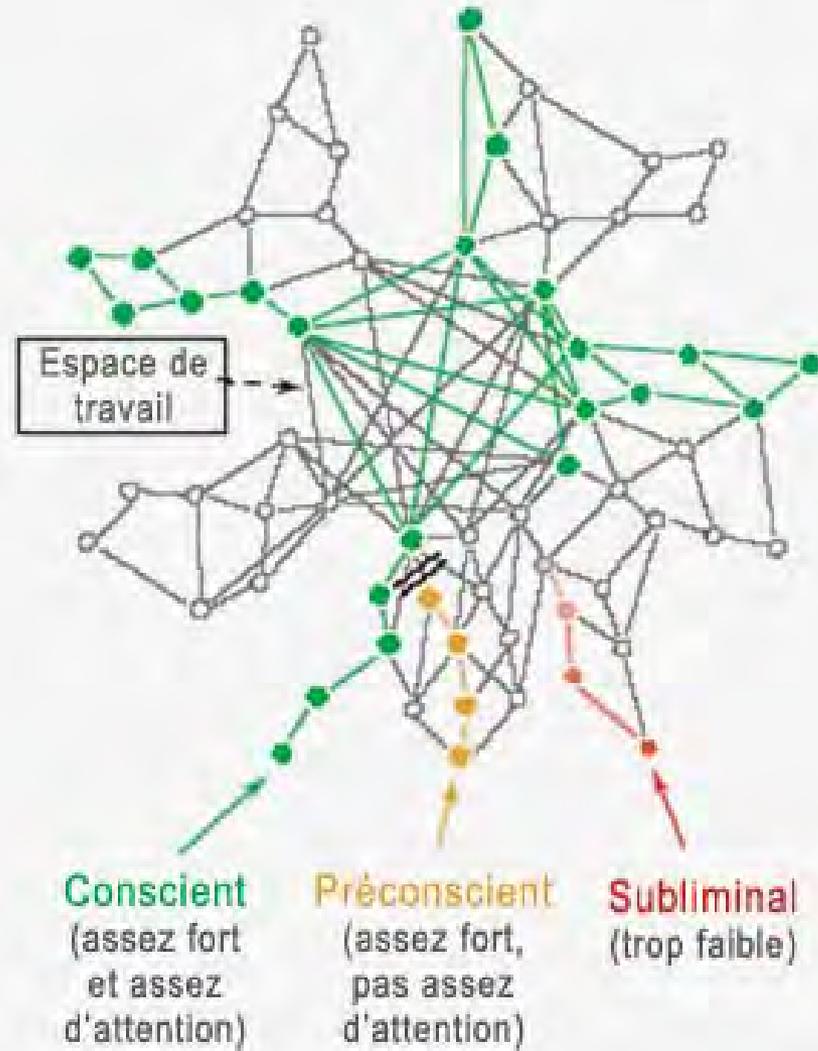
1996

1997

Dans les années  
1990 aussi, un  
nouveau thème  
s'impose :

**la conscience !**





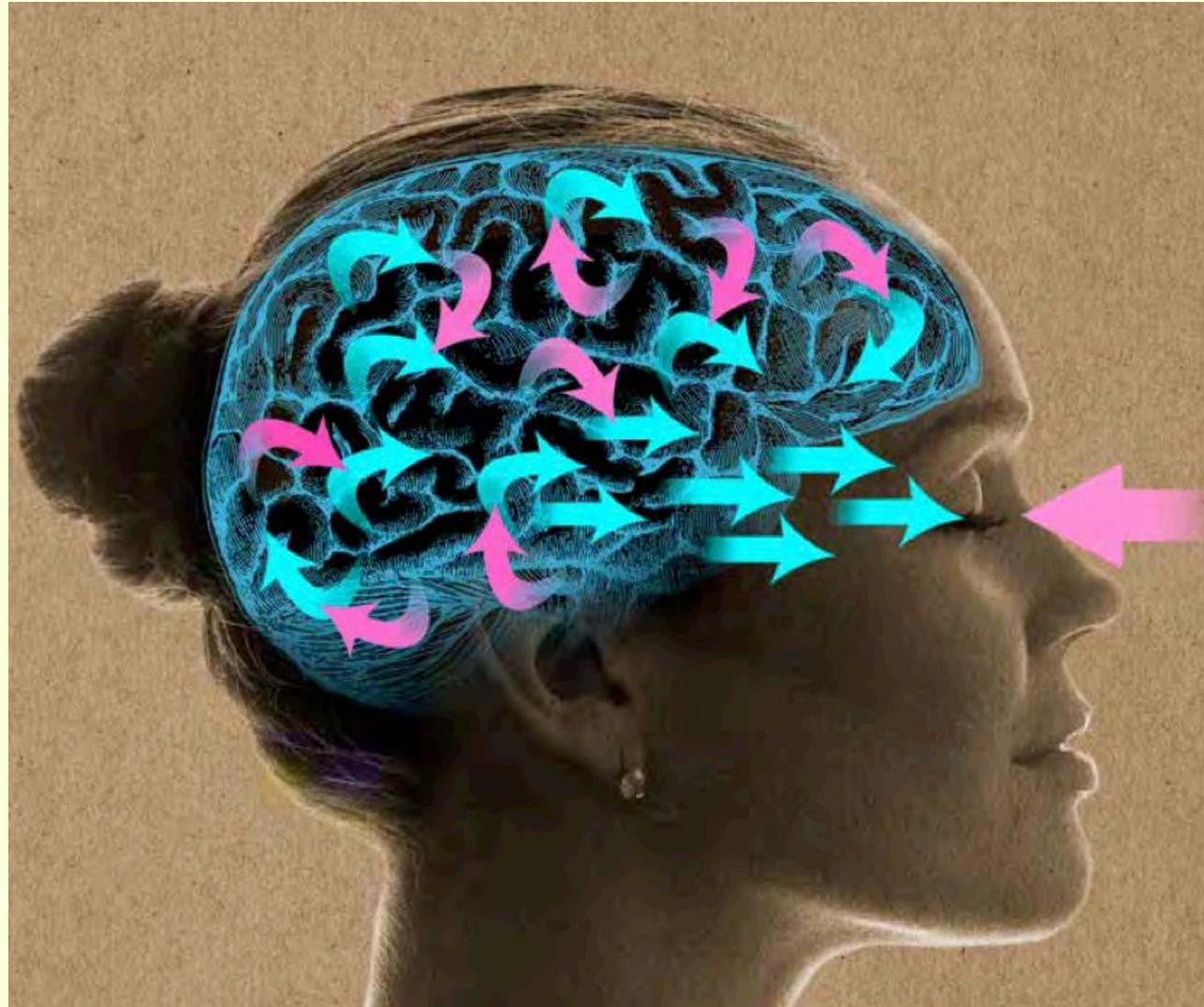
Et finalement, depuis à peine une décennie :

Le cerveau comme une **machine à faire des prédictions** (« the Bayesian Brain »)

## **Le codage prédictif** (« predictive processing »)

Où la perception est vue comme dépendante de prédition « top down » (en bleu) à propos des causes du signal sensoriel

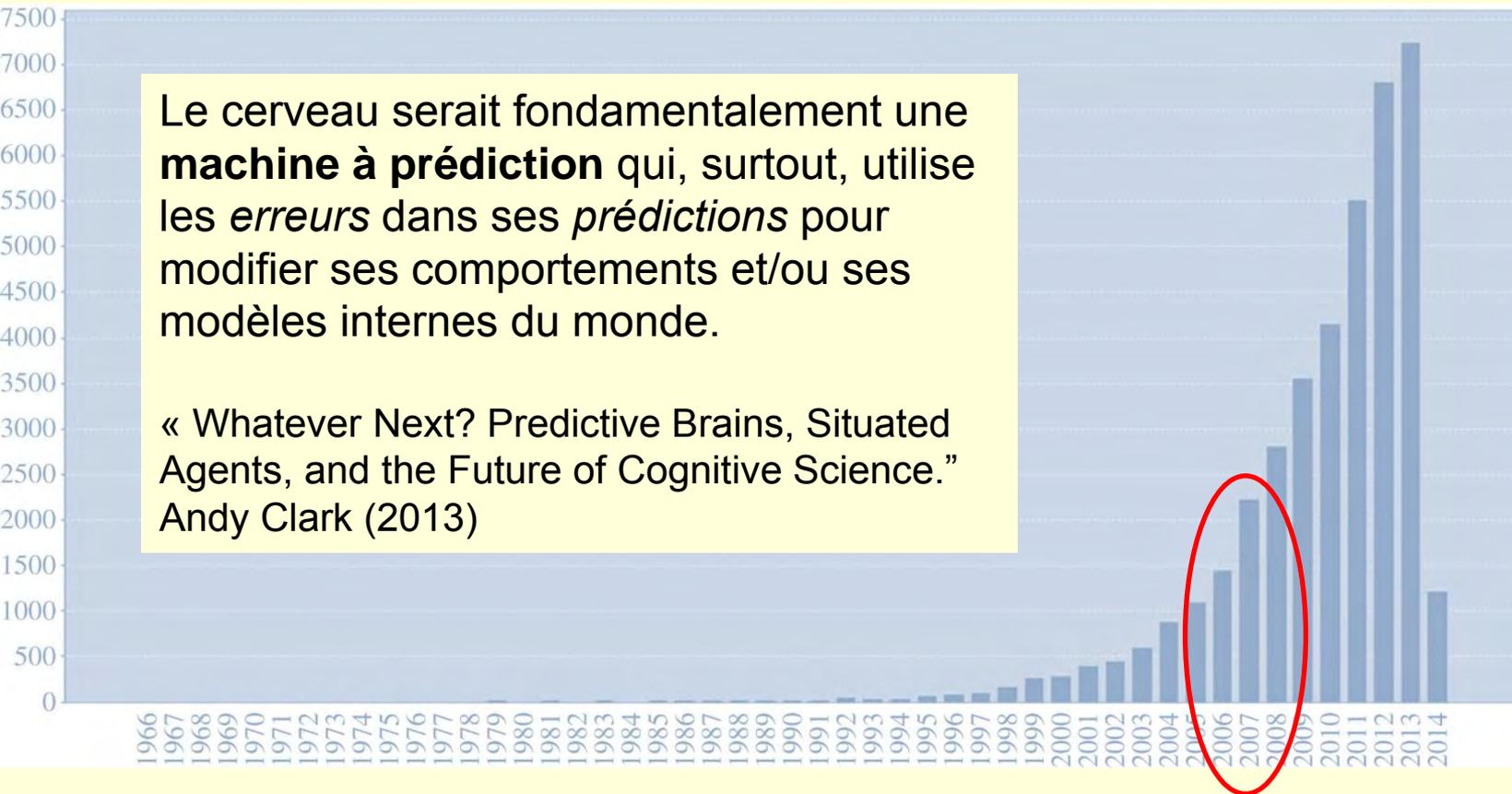
qui ne font qu'indiquer au modèle une « erreur de prédition » (en rose) qui va lui permettre de se mettre à jour (selon les principes de l'inférence Bayésienne)



Recent advances in theoretical neuroscience have inspired **a paradigm shift in cognitive neuroscience** ([figure 1](#)).

Le cerveau serait fondamentalement une **machine à prédiction** qui, surtout, utilise les *erreurs* dans ses *prédictions* pour modifier ses comportements et/ou ses modèles internes du monde.

« Whatever Next? Predictive Brains, Situated Agents, and the Future of Cognitive Science.»  
Andy Clark (2013)



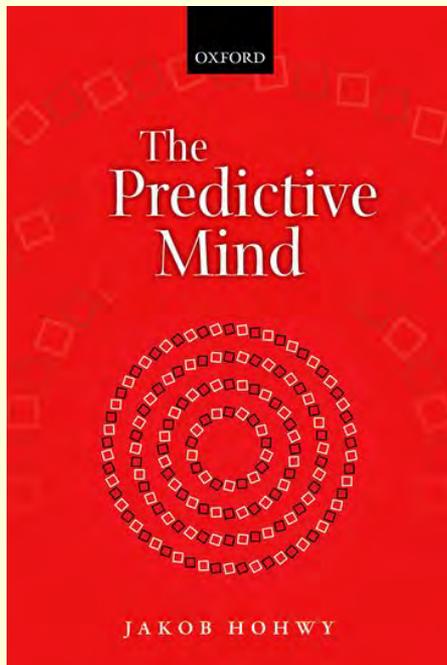
Citations per year, from 1966 to 2014, when searching for TOPIC: **(Bayesian)** AND TOPIC: **(brain)** in Web of Science.

**This shift is away from the brain as a passive filter of sensations towards a view of the brain as a statistical organ that generates hypotheses or fantasies which are tested against sensory evidence [6].**

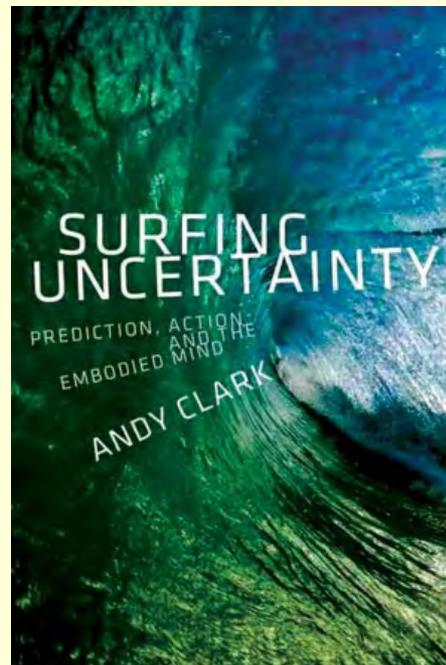
This image of **the brain [...] as an engine of prediction** is a simple and quite elegant one that **can be found in various forms in contemporary neuroscience**.

For useful surveys, see Kveraga et al (2007), Bubic et al (2010), and for my own favorite incarnation, see Friston (2010).

- Andy Clark



2014



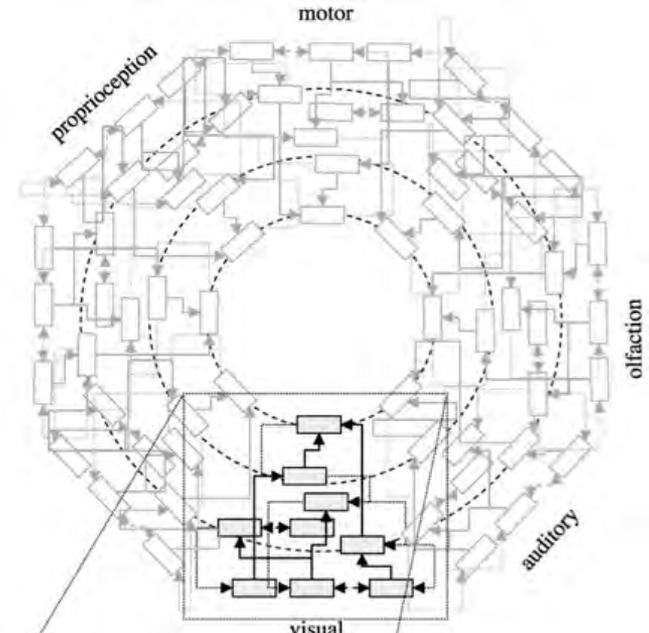
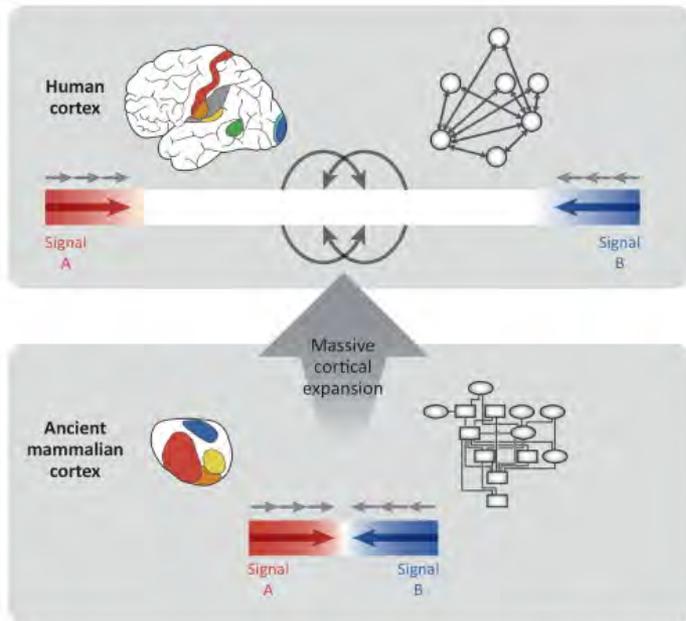
2015

Brains like that are not cognitive couch-potatoes, passively awaiting the next waves of sensory stimulation.

Instead, they are ***pro-active prediction engines*** constantly trying to anticipate the shape of the incoming sensory signal.

Malgré que le cerveau est le fruit d'une évolution bricoleuse, il pourrait y avoir quelques grands principes au cœur de son fonctionnement, guidé par des règles de **frugalité** et de **minimisation de « l'énergie libre »** (du désordre, en quelque sorte...).

Pour cette nouvelle vision, le cerveau est avant tout un :  
« **multi-layer probabilistic prediction machine** ».

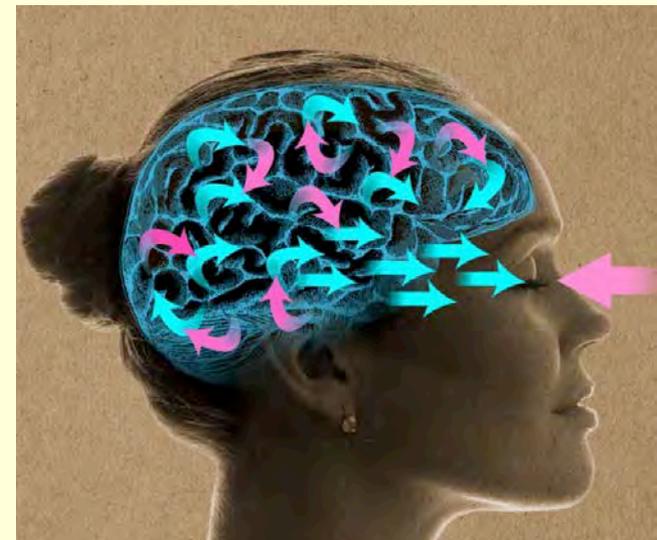
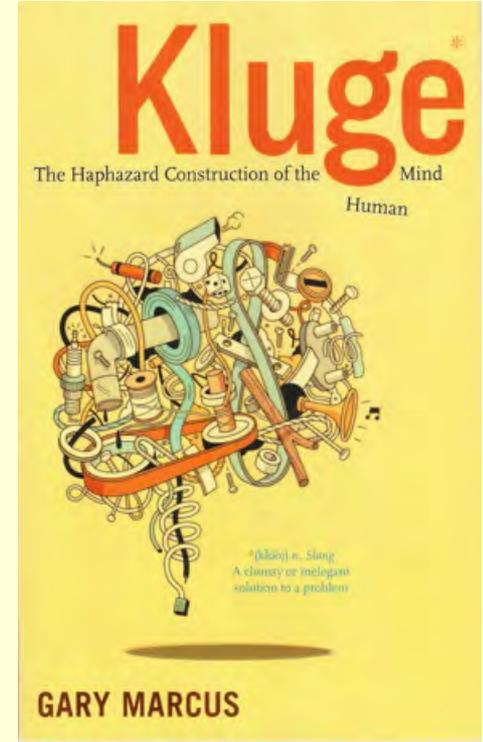


In a 2012 paper the AI pioneer Patrick Winston wrote about the puzzling architecture of the brain – an architecture in which

**“Everything is all mixed up, with information flowing bottom to top and top to bottom and sideways too.”**  
**Adding that “ It is a strange architecture about which we are nearly clueless”.**

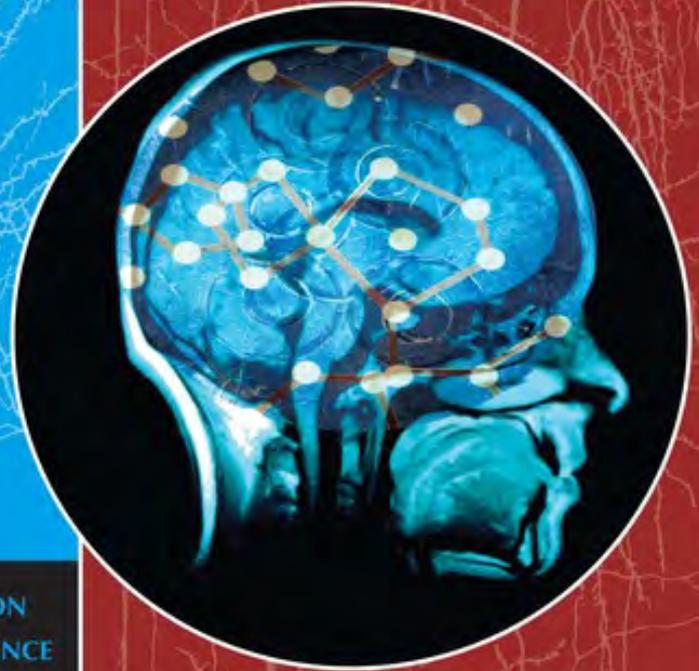
It is a strange architecture indeed. But that state of clueless-ness is mostly past.

A wide variety of work – now spanning neuroscience, psychology, robotics and artificial intelligence – is converging on the idea that one **key role of that downward-flowing influence is to enable higher-levels to attempt** (level-by-level, and as part of a multi-area cascade) **to try to predict lower-level activity and response.**



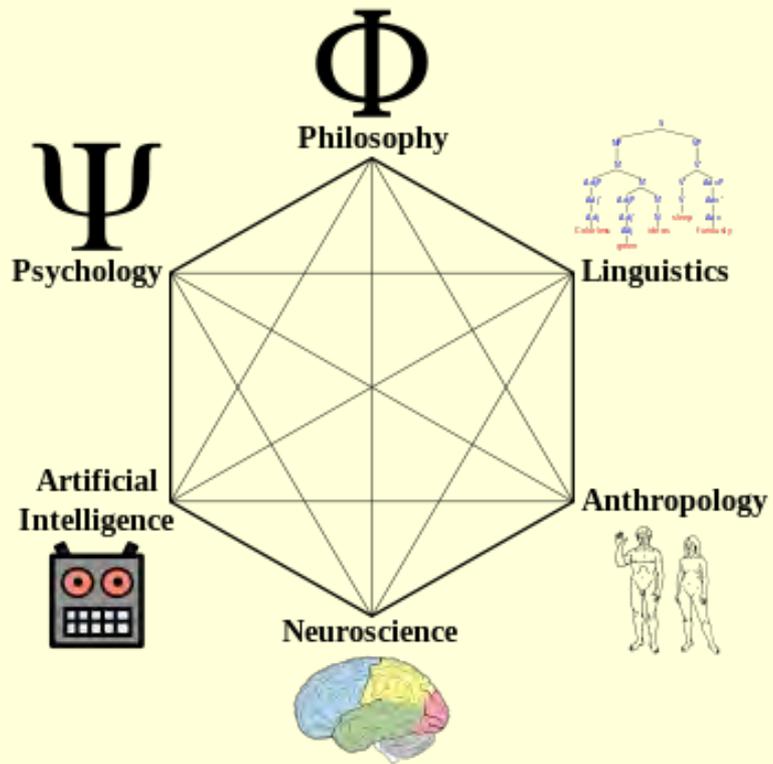
# FROM MOLECULES TO MINDS

Challenges for  
the 21st Century



FORUM ON  
NEUROSCIENCE  
AND NERVOUS  
SYSTEM  
DISORDERS

WORKSHOP SUMMARY



## **Survol des sciences cognitives depuis un siècle**

## **Big History et évolution biologique**

- Où l'on va résumer en 20 minutes 13,7 milliards d'années d'évolution cosmique, chimique et biologique !

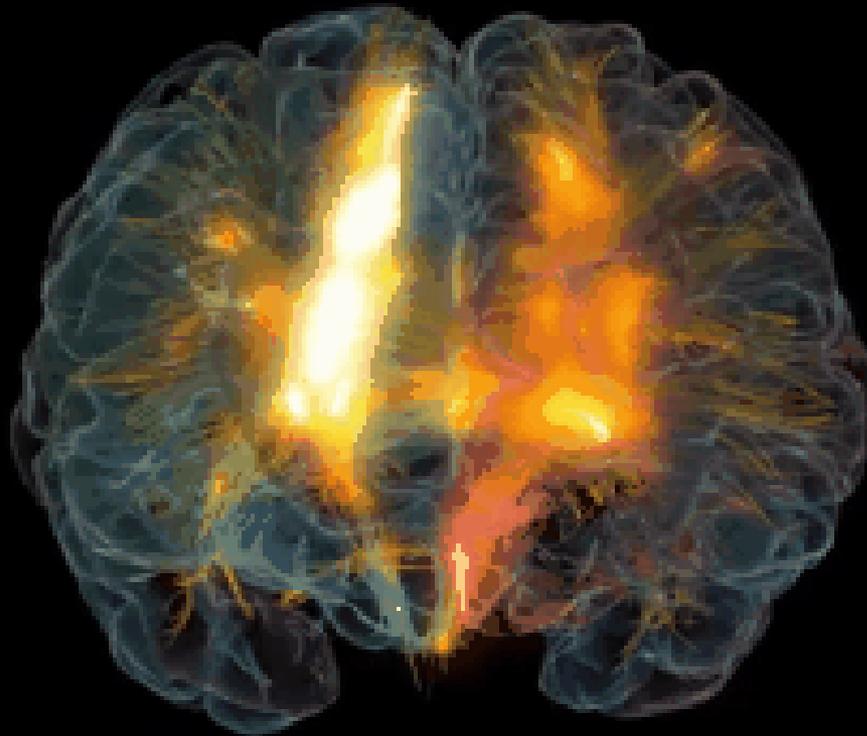
## **Neurobio 101**

Voilà l'objet dont nous allons parler.

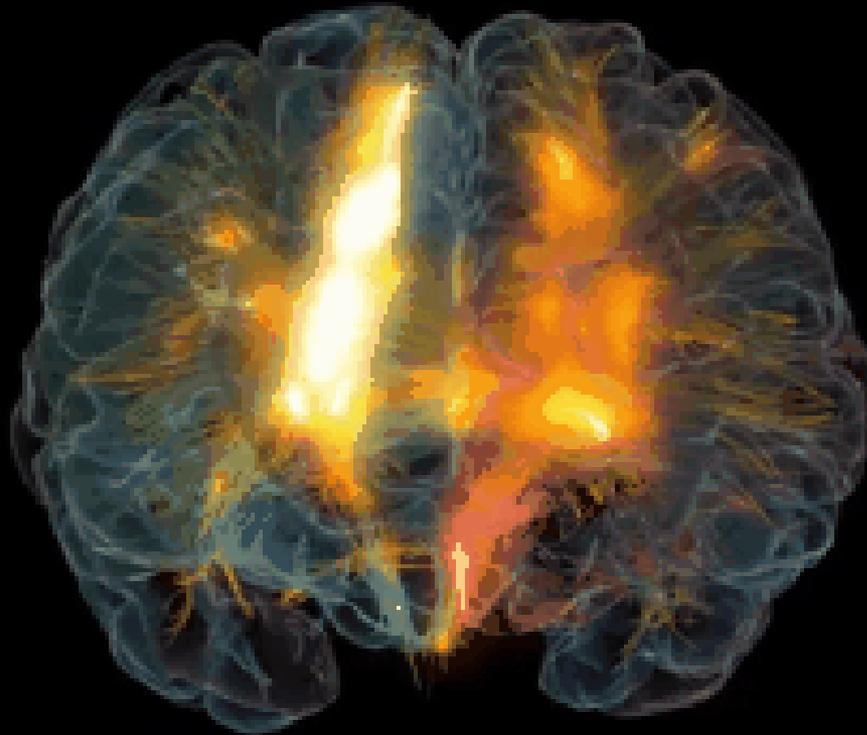
Avec sa forme étrange, mais aussi...

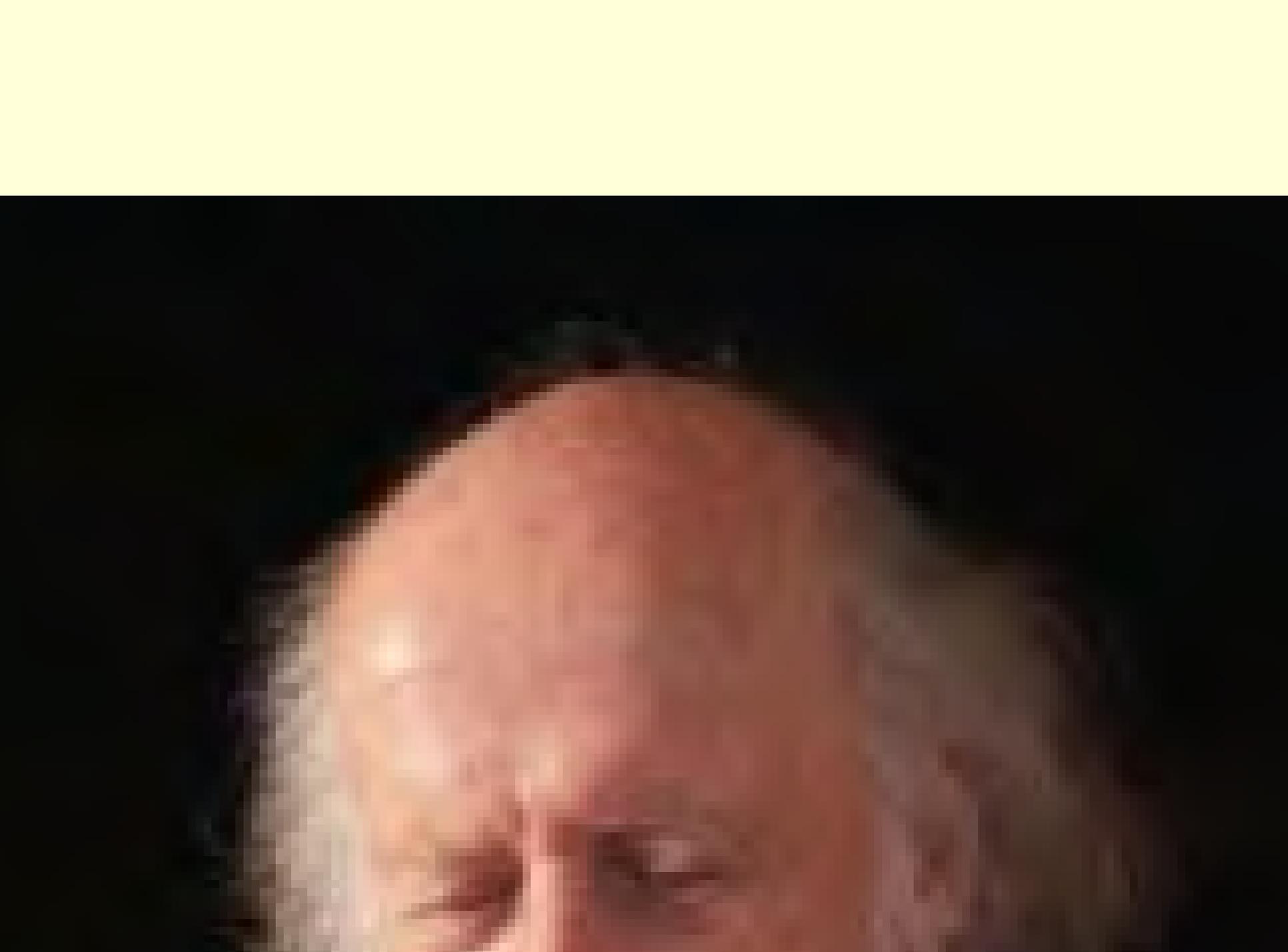


...son activité dynamique incessante,  
C'est probablement l'objet le plus complexe de l'univers connu  
dont on a tous un exemplaire entre les deux oreilles !



Mais c'est pas juste le cerveau qui est complexe,  
c'est toute **la vie avant** lui qui a permis son émergence et toutes  
**les sociétés humaines après** qui se sont constituées grâce à lui !







« Quand vous prenez conscience de votre existence, vous faites l'acte le plus extraordinairement complexe qui n'ait jamais été fait dans l'Univers et cela exige que 100 milliards de milliards de milliards de quarks et d'électrons jouent un rôle précis pour que vous soyez en mesure de **penser** .

Plus de 13,7 milliards d'années d'organisation et de complexification depuis le Big Bang ont été nécessaires pour concrétiser ce simple fait. »

- Hubert Reeves



Qu'est-ce qui rend possible  
cette croissance de la complexité ?



Dans un système isolé comme  
l'univers, **l'énergie se conserve**  
(1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique)

Et...

**l'énergie se dissipe** (ou se dégrade)  
sous forme de chaleur  
(entropie croissante)

(2<sup>e</sup> principe de la thermodynamique)





Il peut donc y avoir croissance de complexité localement...



...parce qu'il continue d'y avoir croissance du désordre à l'échelle de l'univers.

Il y a donc croissance de complexité (et donc baisse d'entropie, de désordre) dans ce qu'on appelle des **systemes ouverts** (du point de vue thermodynamique),

c'est-à-dire qui doivent échanger de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur pour maintenir leur structure.

"Such islands of order in a sea of disorder" are characteristic of the "**dissipative structures**" of living systems.

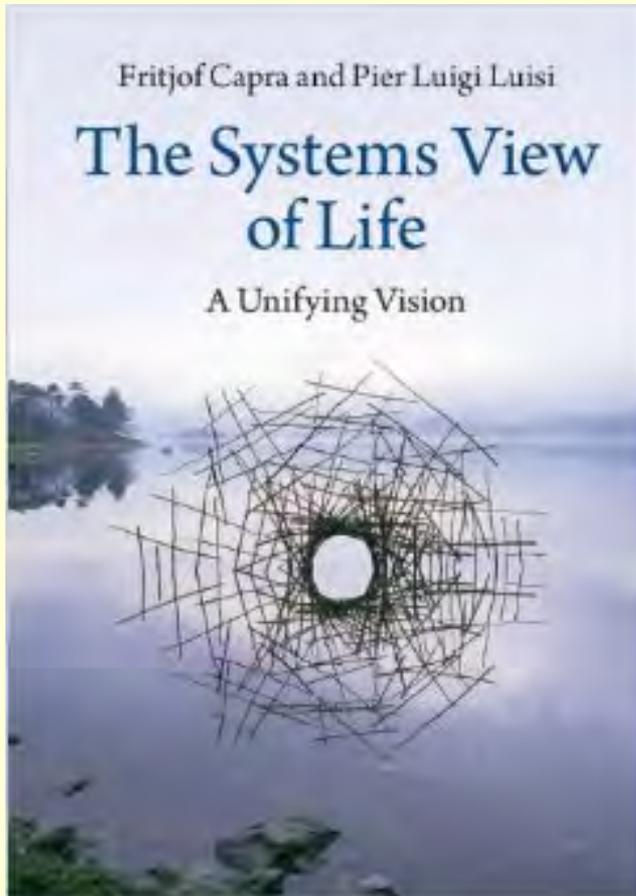
- The Systems View of Life

## 4<sup>E</sup> HEURE : Concepts et modèles

Contrôle de l'attention :  
"bottom up" et "top down"

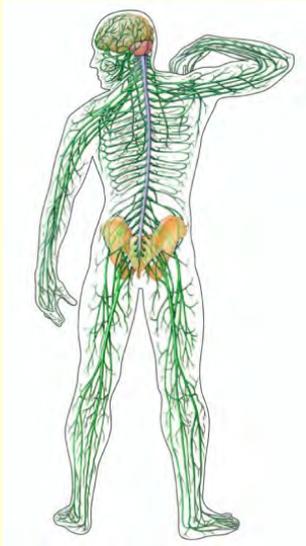
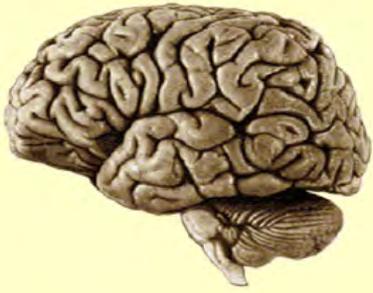
Inconscient et conscience

Codage prédictif  
(« predictive processing »)



Durant l'histoire occidentale de la science et de la philosophie, il y a eu une tension entre 2 perspectives :

- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?
- l'étude de la **forme** : quel est le pattern ?



- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?

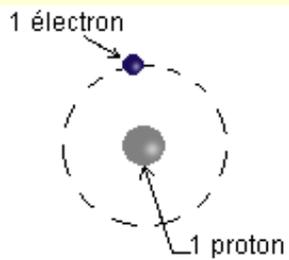




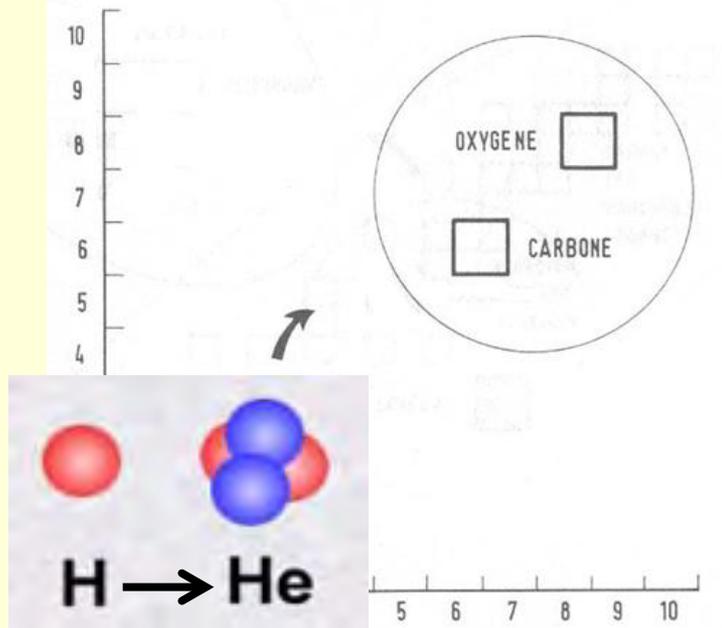
- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?

Les êtres vivants et la matière inerte sont faits des mêmes **atomes**.

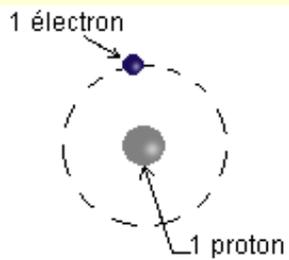
C'est justement leur forme, leur pattern d'organisation qui va les différencier...



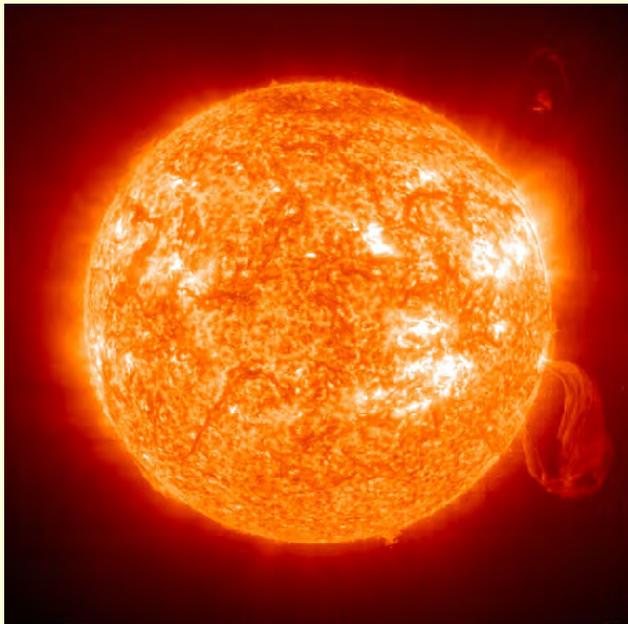
# Combustion de l'hélium



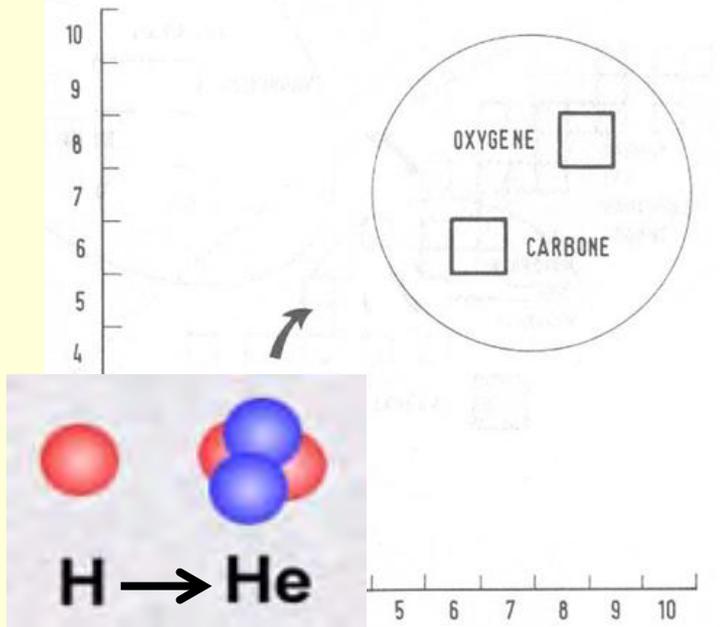
- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?



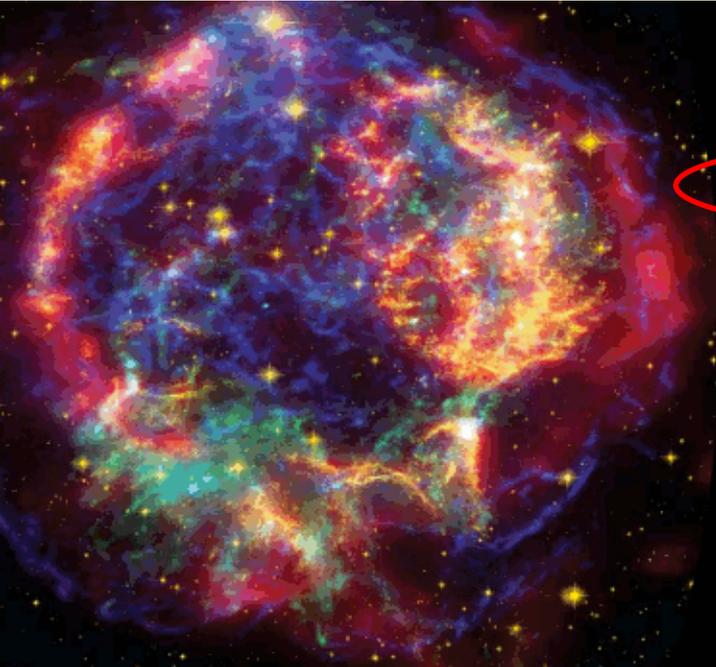
Hydrogène



# Combustion de l'hélium



- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?



**Elles s'éclatent pour vous!**

Sans les étoiles mortes, vous ne seriez pas là.

Le calcium de vos os, l'oxygène que vous respirez et le fer dans votre sang ont tous été formés dans des étoiles disparues depuis des milliards d'années.

[craq-astro.ca](http://craq-astro.ca)

[CoolCosmos.net](http://CoolCosmos.net)

# Tableau Périodique des Éléments

|                                 |                                  |                                   |                                 |                                     |                                 |                                    |                                 |                                  |                                  |                                    |                                   |                                 |                                  |                                    |                                    |                                   |                               |                             |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1<br>IA<br>New<br>Original      |                                  |                                   |                                 |                                     |                                 |                                    |                                 |                                  |                                  |                                    |                                   |                                 |                                  |                                    |                                    |                                   | 18<br>VIIIA                   |                             |
| 1<br>H<br>Hydrogène<br>1.00794  |                                  |                                   |                                 |                                     |                                 |                                    |                                 |                                  |                                  |                                    |                                   |                                 |                                  |                                    |                                    |                                   | 2<br>He<br>Hélium<br>4.002602 |                             |
| 3<br>Li<br>Lithium<br>6.941     | 4<br>Be<br>Béryllium<br>9.012182 |                                   |                                 |                                     |                                 |                                    |                                 |                                  |                                  |                                    |                                   |                                 |                                  |                                    |                                    |                                   |                               | 10<br>Ne<br>Néon<br>20.1797 |
| 11<br>Na<br>Sodium<br>22.989770 | 12<br>Mg<br>Magnésium<br>24.3050 | 3<br>IIIB                         | 4<br>IVB                        | 5<br>VB                             | 6<br>VIB                        | 7<br>VIIB                          | 8                               | 9<br>VIII B                      | 10                               | 11<br>IB                           | 12<br>IIB                         | 13<br>IIIA                      | 14<br>IVA                        | 15<br>VA                           | 16<br>VIA                          | 17<br>VIIA                        | 18<br>VIIIA                   |                             |
| 19<br>K<br>Potassium<br>39.0983 | 20<br>Ca<br>Calcium<br>40.078    | 21<br>Sc<br>Scandium<br>44.955910 | 22<br>Ti<br>Titane<br>47.867    | 23<br>V<br>Vanadium<br>50.9415      | 24<br>Cr<br>Chrome<br>51.9961   | 25<br>Mn<br>Manganèse<br>54.938049 | 26<br>Fe<br>Fer<br>55.8457      | 27<br>Co<br>Cobalt<br>58.933200  | 28<br>Ni<br>Nickel<br>58.6934    | 29<br>Cu<br>Cuivre<br>63.546       | 30<br>Zn<br>Zinc<br>65.409        | 31<br>Ga<br>Gallium<br>69.723   | 32<br>Ge<br>Germanium<br>72.64   | 33<br>As<br>Arsenic<br>74.92160    | 34<br>Se<br>Sélénium<br>78.96      | 35<br>Br<br>Brome<br>79.904       | 36<br>Kr<br>Krypton<br>83.798 |                             |
| 37<br>Rb<br>Rubidium<br>87.4678 | 38<br>Sr<br>Strontium<br>87.62   | 39<br>Y<br>Yttrium<br>88.90585    | 40<br>Zr<br>Zirconium<br>91.224 | 41<br>Nb<br>Niobium<br>92.90638     | 42<br>Mo<br>Molybdène<br>95.94  | 43<br>Tc<br>Technétium<br>(98)     | 44<br>Ru<br>Ruthénium<br>101.07 | 45<br>Rh<br>Rhodium<br>102.90550 | 46<br>Pd<br>Palladium<br>106.42  | 47<br>Ag<br>Argent<br>107.8682     | 48<br>Cd<br>Cadmium<br>112.411    | 49<br>In<br>Indium<br>114.818   | 50<br>Sn<br>Étain<br>118.710     | 51<br>Sb<br>Antimoine<br>121.760   | 52<br>Te<br>Tellure<br>127.60      | 53<br>I<br>Iode<br>126.90447      | 54<br>Xe<br>Xénon<br>131.293  |                             |
| 55<br>Cs<br>Césium<br>132.90545 | 56<br>Ba<br>Baryum<br>137.327    | 57 to 71                          |                                 | 72<br>Hf<br>Hafnium<br>178.49       | 73<br>Ta<br>Tantale<br>180.9479 | 74<br>W<br>Tungstène<br>183.84     | 75<br>Re<br>Rhénium<br>186.207  | 76<br>Os<br>Osmium<br>190.23     | 77<br>Ir<br>Iridium<br>192.217   | 78<br>Pt<br>Platine<br>195.078     | 79<br>Au<br>Or<br>196.96655       | 80<br>Hg<br>Mercure<br>200.59   | 81<br>Tl<br>Thallium<br>204.3833 | 82<br>Pb<br>Plomb<br>207.2         | 83<br>Bi<br>Bismuth<br>208.98038   | 84<br>Po<br>Polonium<br>(209)     | 85<br>At<br>Astate<br>(210)   | 86<br>Rn<br>Radon<br>(222)  |
| 87<br>Fr<br>Francium<br>(223)   | 88<br>Ra<br>Radium<br>(226)      | 89 to 103                         |                                 | 104<br>Rf<br>Rutherfordium<br>(261) | 105<br>Db<br>Dubnium<br>(262)   | 106<br>Sg<br>Seaborgium<br>(266)   | 107<br>Bh<br>Bohrium<br>(264)   | 108<br>Hs<br>Hassium<br>(269)    | 109<br>Mt<br>Meitnerium<br>(268) | 110<br>Ds<br>Darmstadtium<br>(271) | 111<br>Rg<br>Roentgenium<br>(272) | 112<br>Uub<br>Ununbium<br>(285) | 113<br>Uut<br>Ununtrium<br>(284) | 114<br>Uuq<br>Ununquadium<br>(289) | 115<br>Uup<br>Ununpentium<br>(288) | 116<br>Uuh<br>Ununhexium<br>(292) | 117<br>Uus<br>Ununseptium     | 118<br>Uuo<br>Ununoctium    |

- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Lanthanides
- Actinides
- Métaux pauvres
- Non-métaux
- Gaz rares
- C** Solide
- Br** Liquide
- H** Gaz
- Tc** Artificiel

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Design Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com) http://www.dayah.com/periodic/

|                                  |                                 |                                       |                                 |                                 |                                |                                 |                                  |                                  |                                   |                                  |                               |                                   |                                 |                                  |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 57<br>La<br>Lanthane<br>138.9055 | 58<br>Ce<br>Cérium<br>140.116   | 59<br>Pr<br>Praséodyme<br>140.90765   | 60<br>Nd<br>Néodyme<br>144.24   | 61<br>Pm<br>Prométhium<br>(145) | 62<br>Sm<br>Samarium<br>150.36 | 63<br>Eu<br>Europium<br>151.964 | 64<br>Gd<br>Gadolinium<br>157.25 | 65<br>Tb<br>Terbium<br>158.92534 | 66<br>Dy<br>Dysprosium<br>162.500 | 67<br>Ho<br>Holmium<br>164.93032 | 68<br>Er<br>Erbium<br>167.259 | 69<br>Tm<br>Thulium<br>168.93421  | 70<br>Yb<br>Ytterbium<br>173.04 | 71<br>Lu<br>Lutécium<br>174.967  |
| 89<br>Ac<br>Actinium<br>(227)    | 90<br>Th<br>Thorium<br>232.0381 | 91<br>Pa<br>Protactinium<br>231.03588 | 92<br>U<br>Uranium<br>238.02891 | 93<br>Np<br>Neptunium<br>(237)  | 94<br>Pu<br>Plutonium<br>(244) | 95<br>Am<br>Américium<br>(243)  | 96<br>Cm<br>Curium<br>(247)      | 97<br>Bk<br>Berkélium<br>(247)   | 98<br>Cf<br>Californium<br>(251)  | 99<br>Es<br>Einsteinium<br>(252) | 100<br>Fm<br>Fermium<br>(257) | 101<br>Md<br>Mendelevium<br>(258) | 102<br>No<br>Nobélium<br>(259)  | 103<br>Lr<br>Lawrencium<br>(262) |

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Quand on essaie de  
comprendre sa place  
dans l'univers,

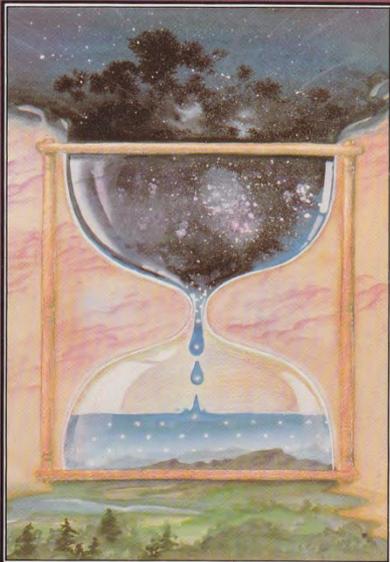


Quand on essaie de comprendre sa place dans l'univers,

Hubert Reeves

# PATIENCE DANS L'AZUR

L'ÉVOLUTION COSMIQUE

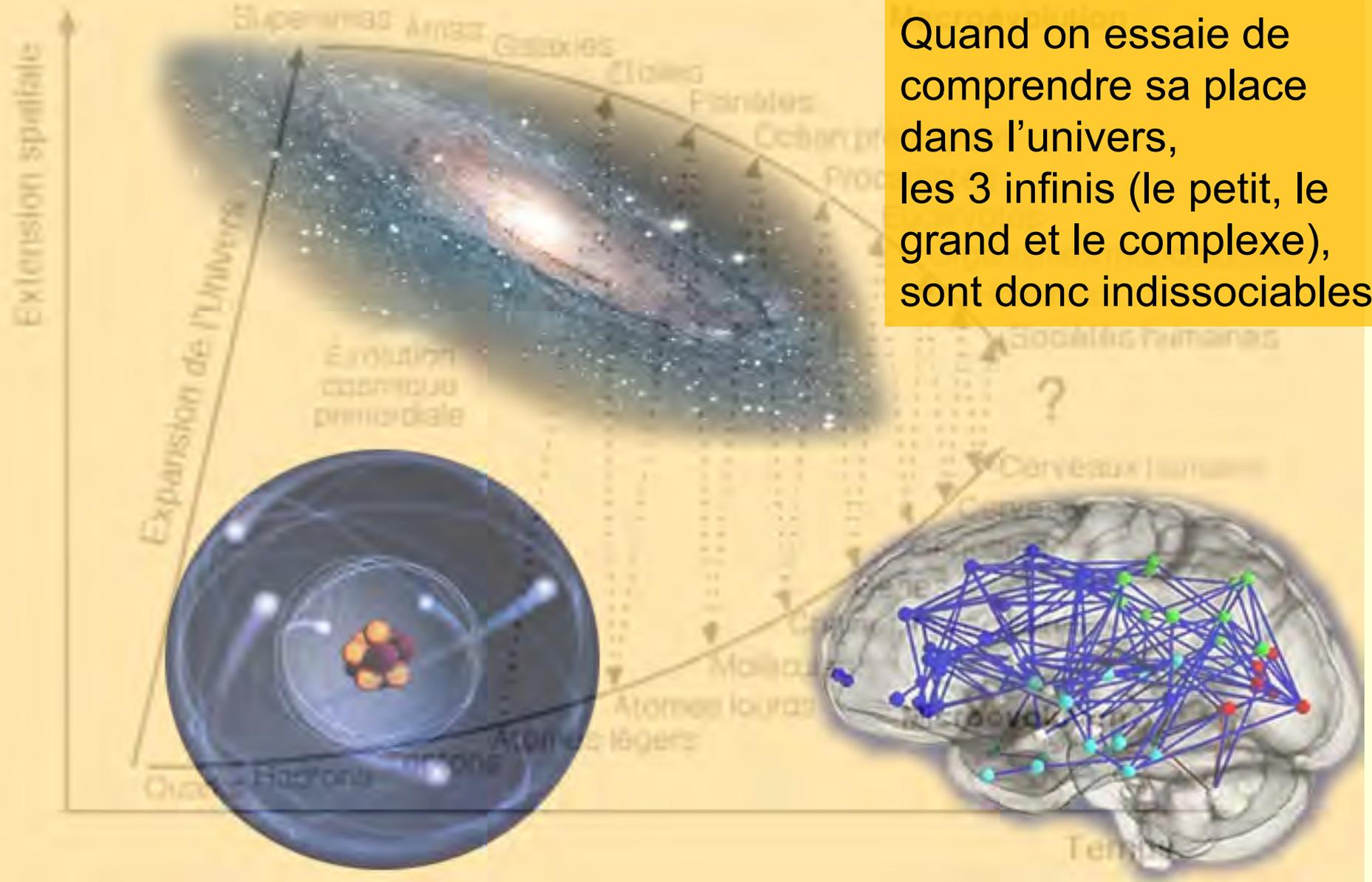


QUÉBEC SCIENCE  
ÉDITEUR

(1981)

## BIG HISTORY PROJECT

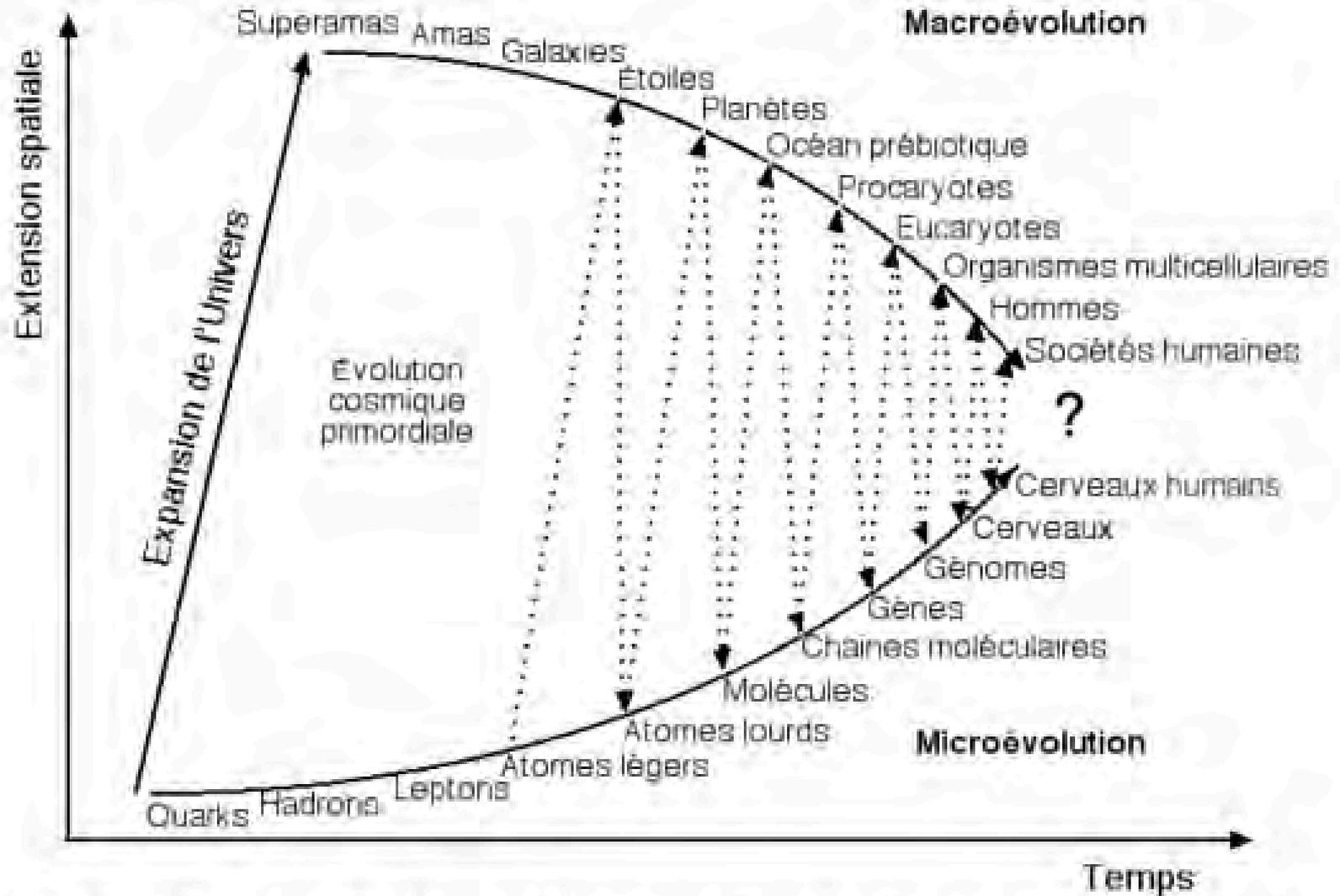




Quand on essaie de comprendre sa place dans l'univers, les 3 infinis (le petit, le grand et le complexe), sont donc indissociables.

# Les trois infinis : le petit, le grand et le complexe

<http://www.upopmontreal.com/hiver-2015/les-trois-infinis-le-petit-le-grand-et-le-complexe/>

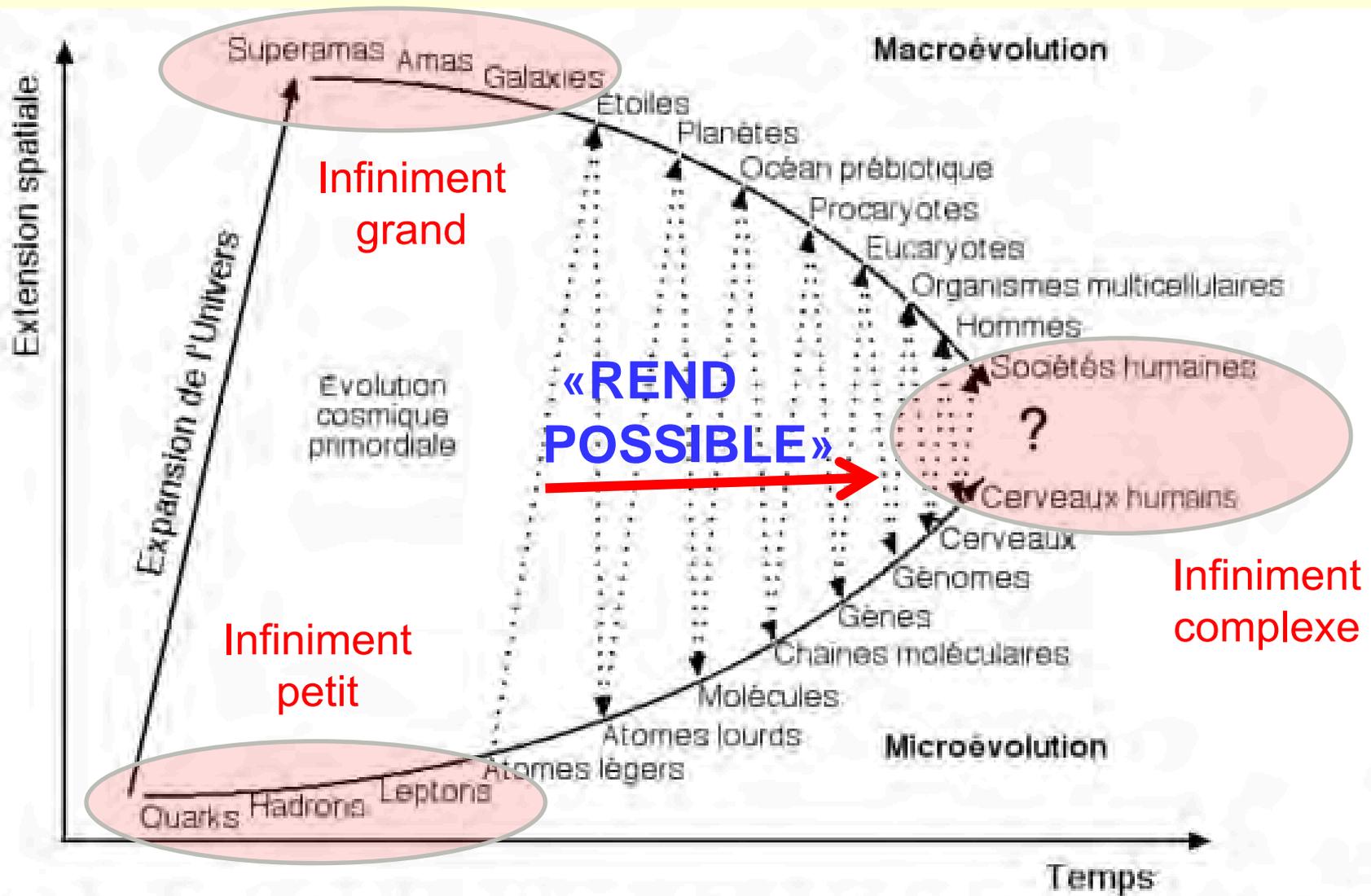


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

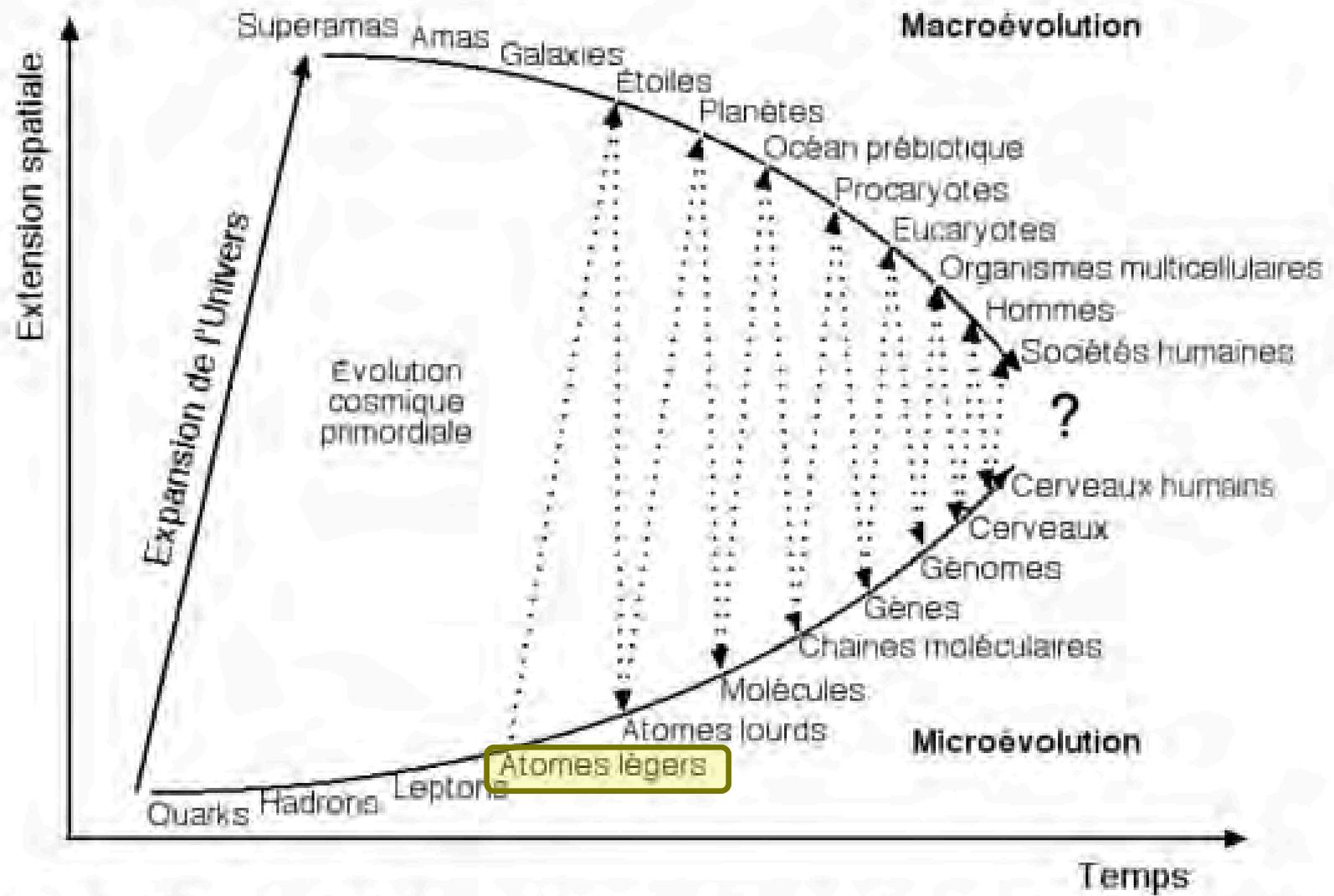
Université du troisième âge des Laurentides et de Boucherville (21 janvier - 15 mars 2016)

**Cours 1: A- Multidisciplinarité des sciences cognitives; B- D'où venons-nous ?**

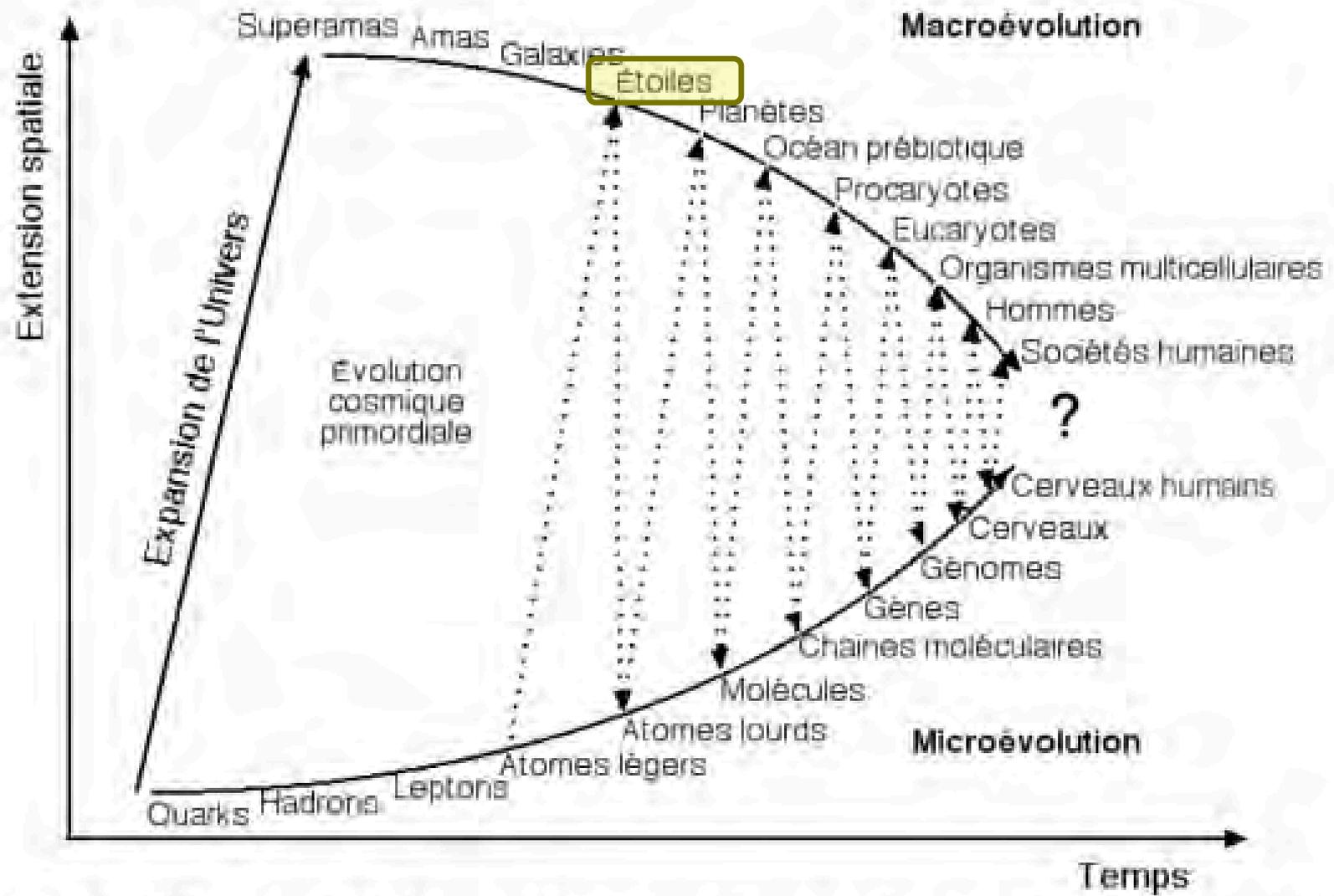
[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop\\_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%201%20-%20A-%20Multidisciplinarit%E9%20des%20sciences%20cognitives%20-%20B-%20%C9volution%20-%20aut%202015%20-%20pour%20pdf.pdf](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%201%20-%20A-%20Multidisciplinarit%E9%20des%20sciences%20cognitives%20-%20B-%20%C9volution%20-%20aut%202015%20-%20pour%20pdf.pdf)



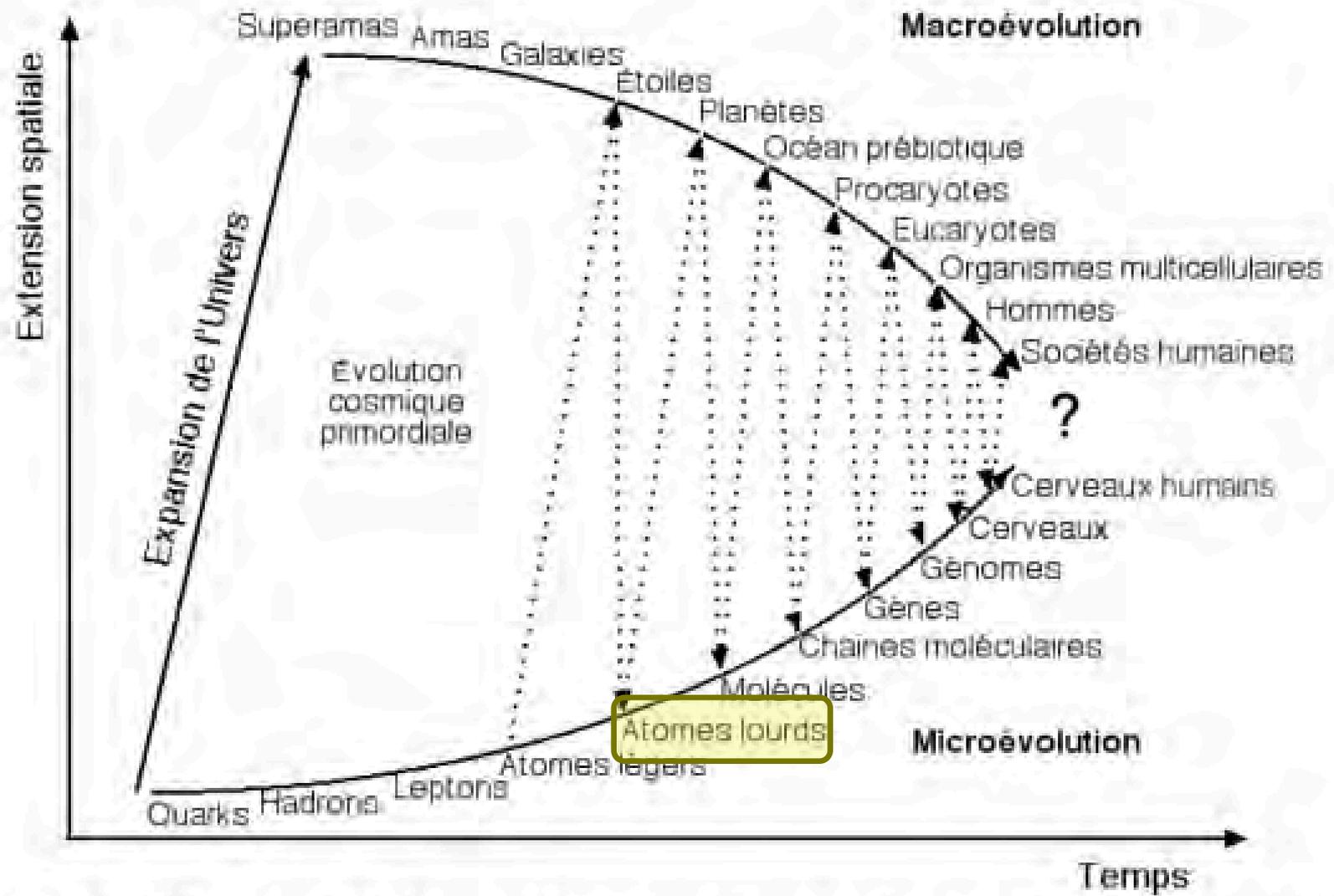
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



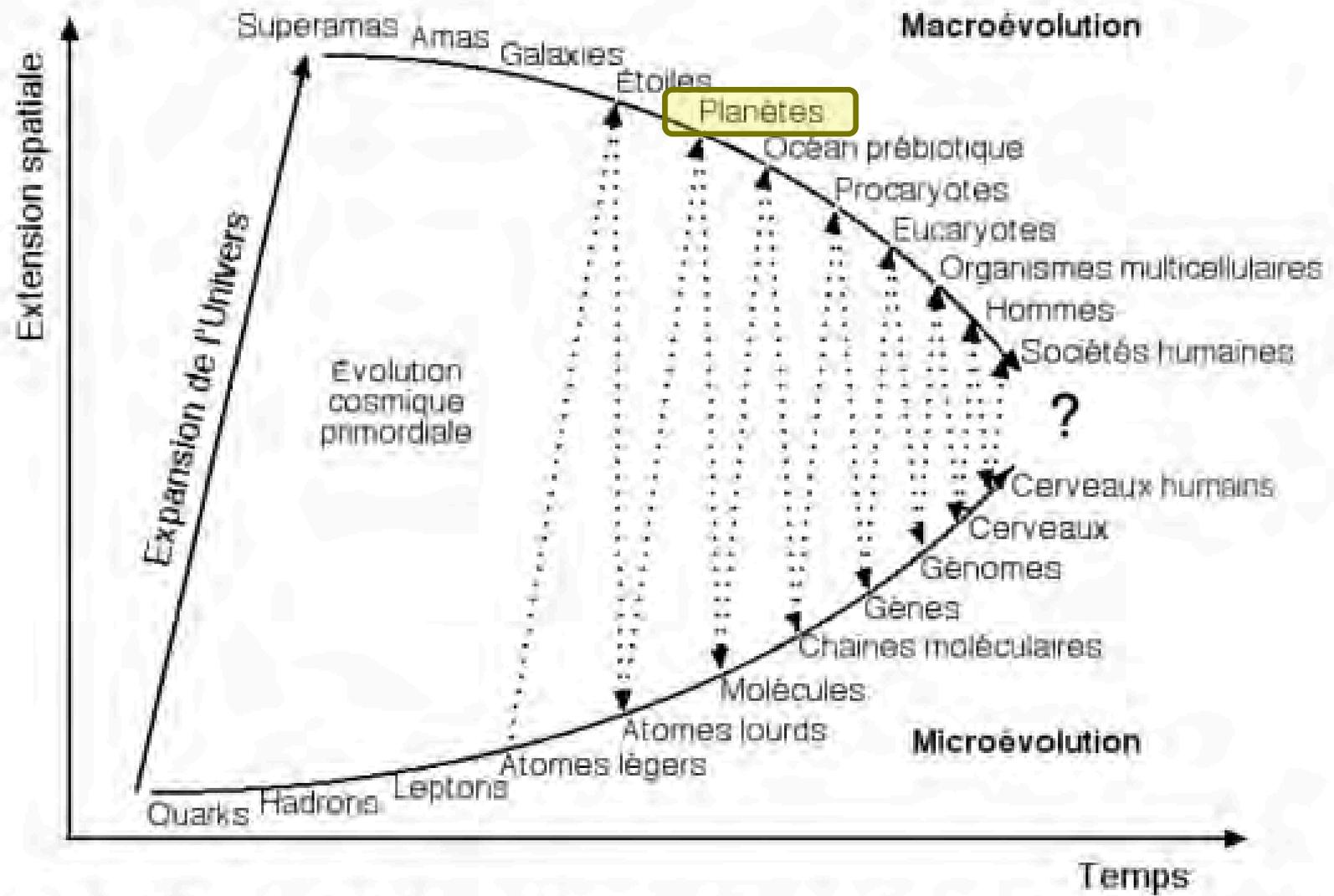
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



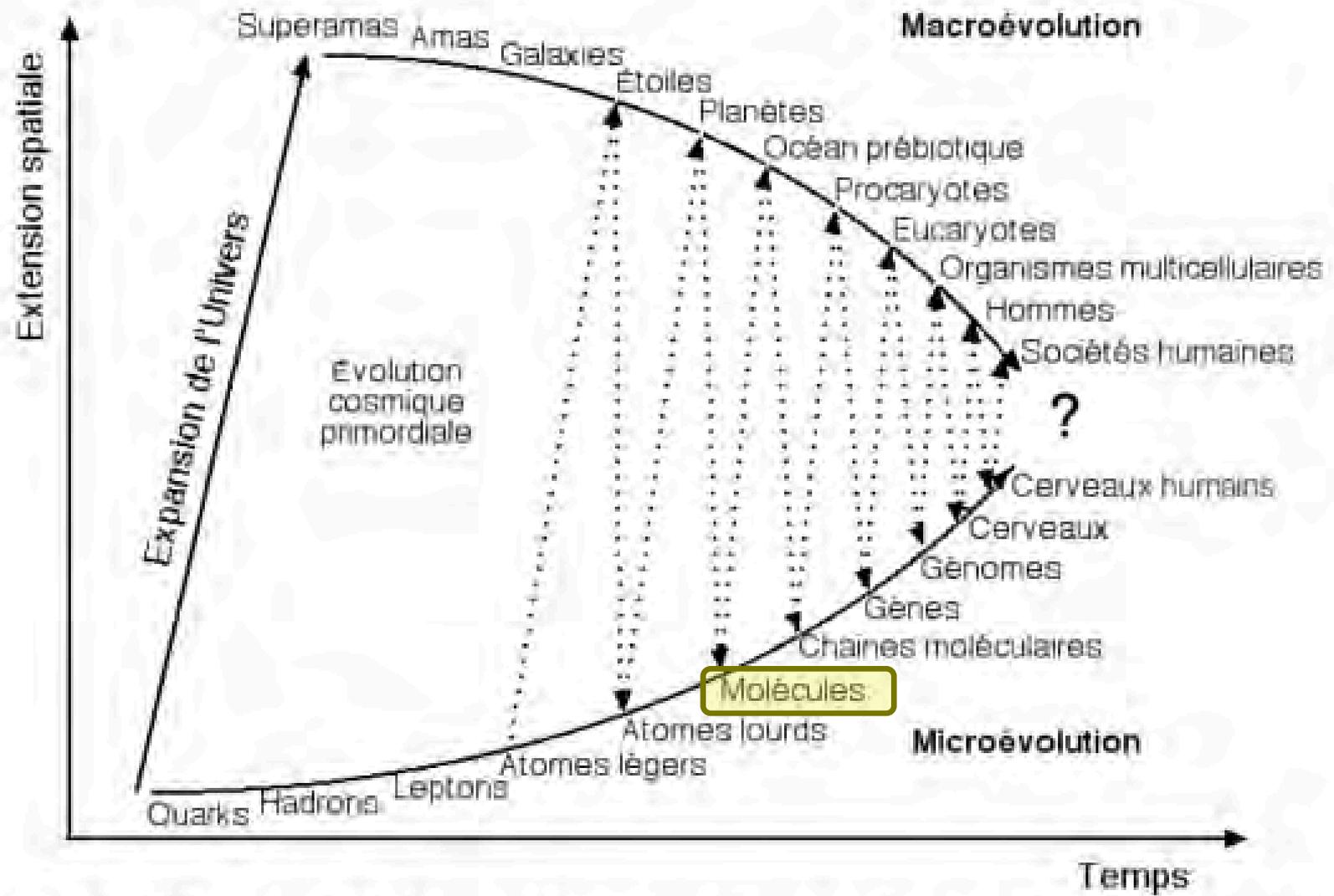
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

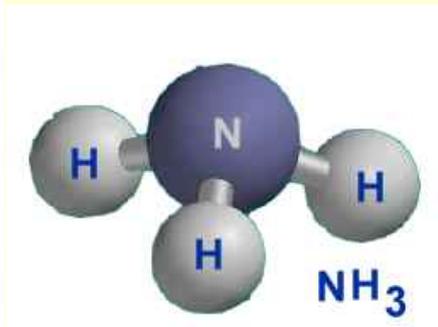
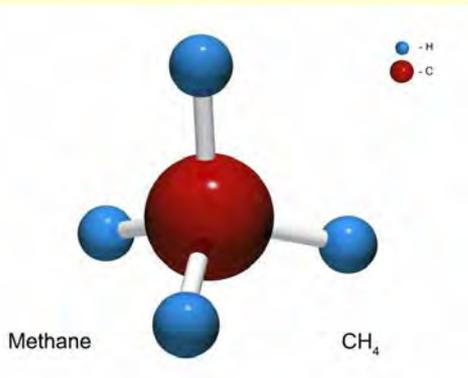
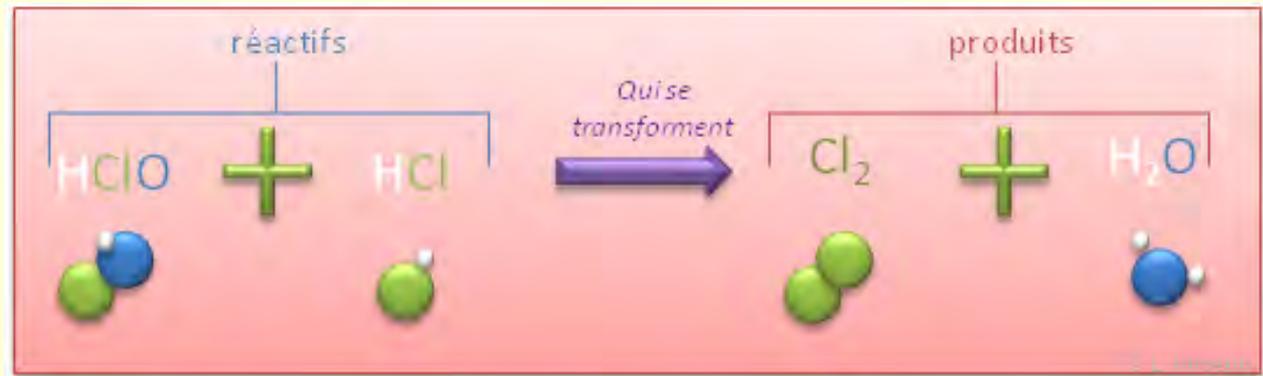


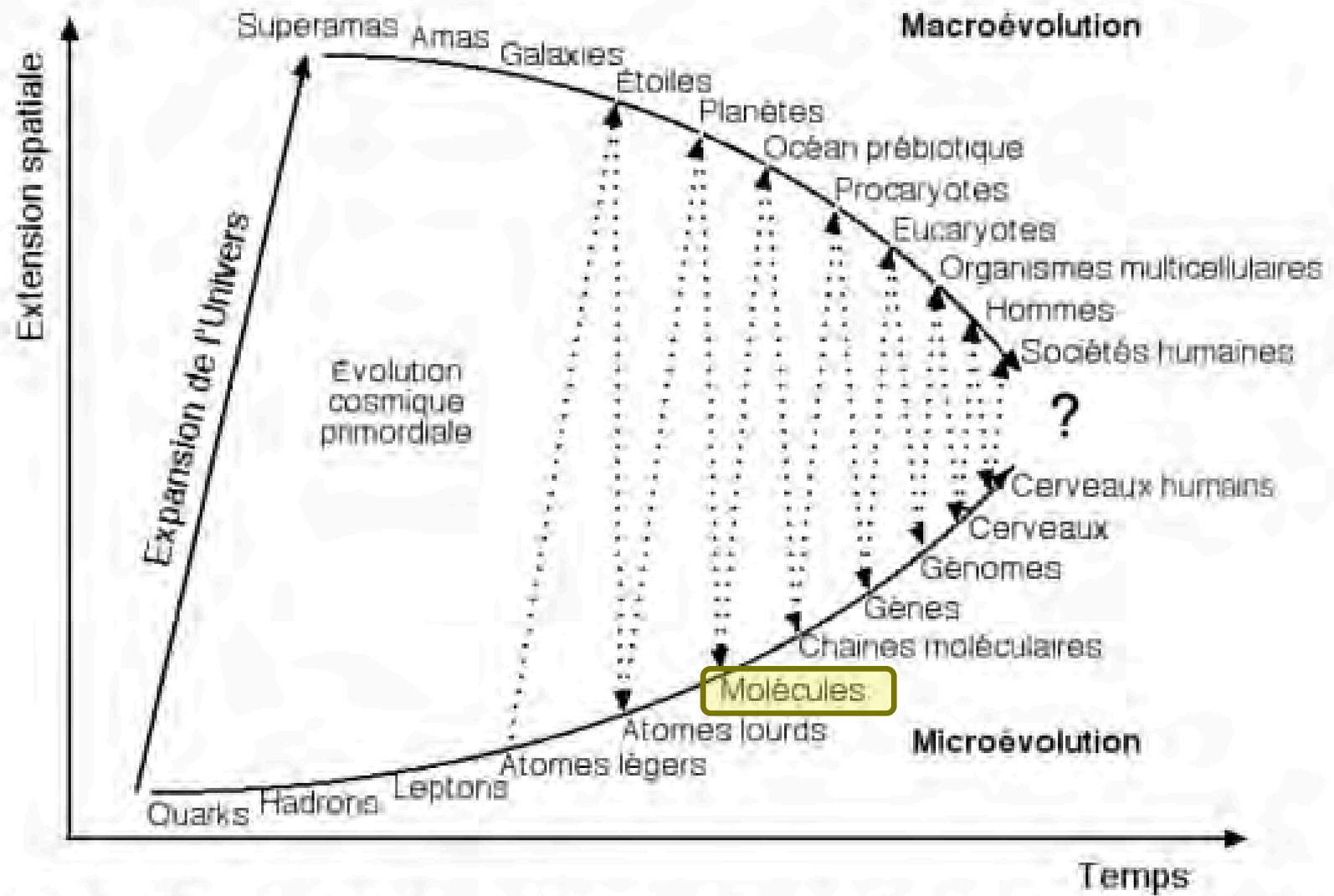
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

## Molécule :

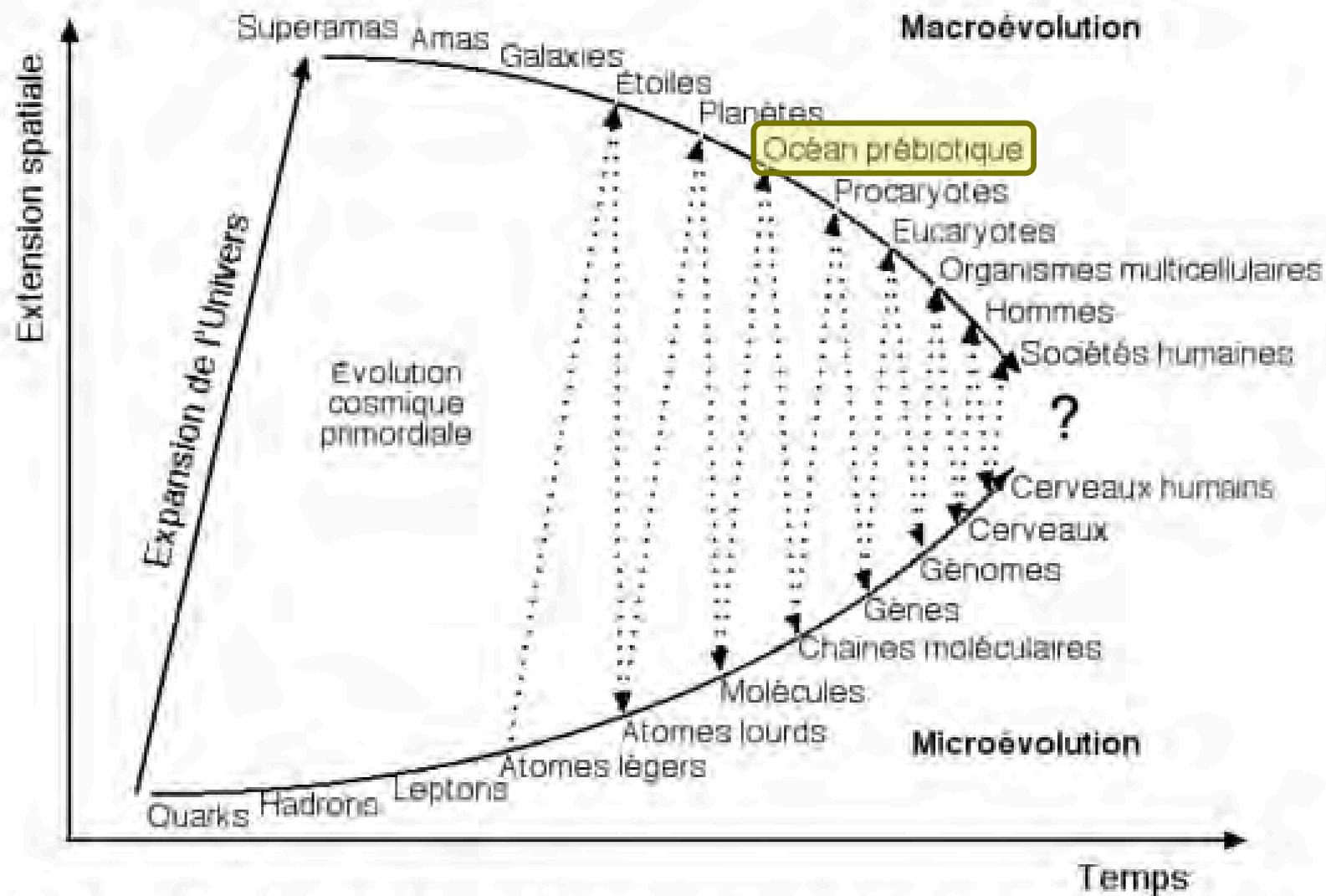
Les molécules constituent des **agrégats atomiques** liés par des liaisons dites « covalentes » d'au moins deux atomes, différents ou non.

L'assemblage d'atomes constituant une molécule peut se transformer en une ou plusieurs autres molécules ; c'est ce qu'on appelle une **réaction chimique**.





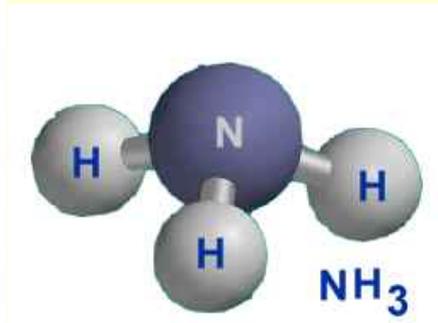
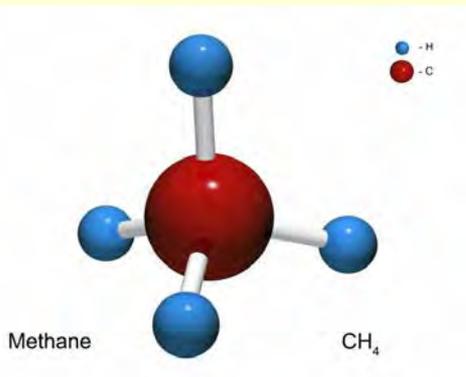
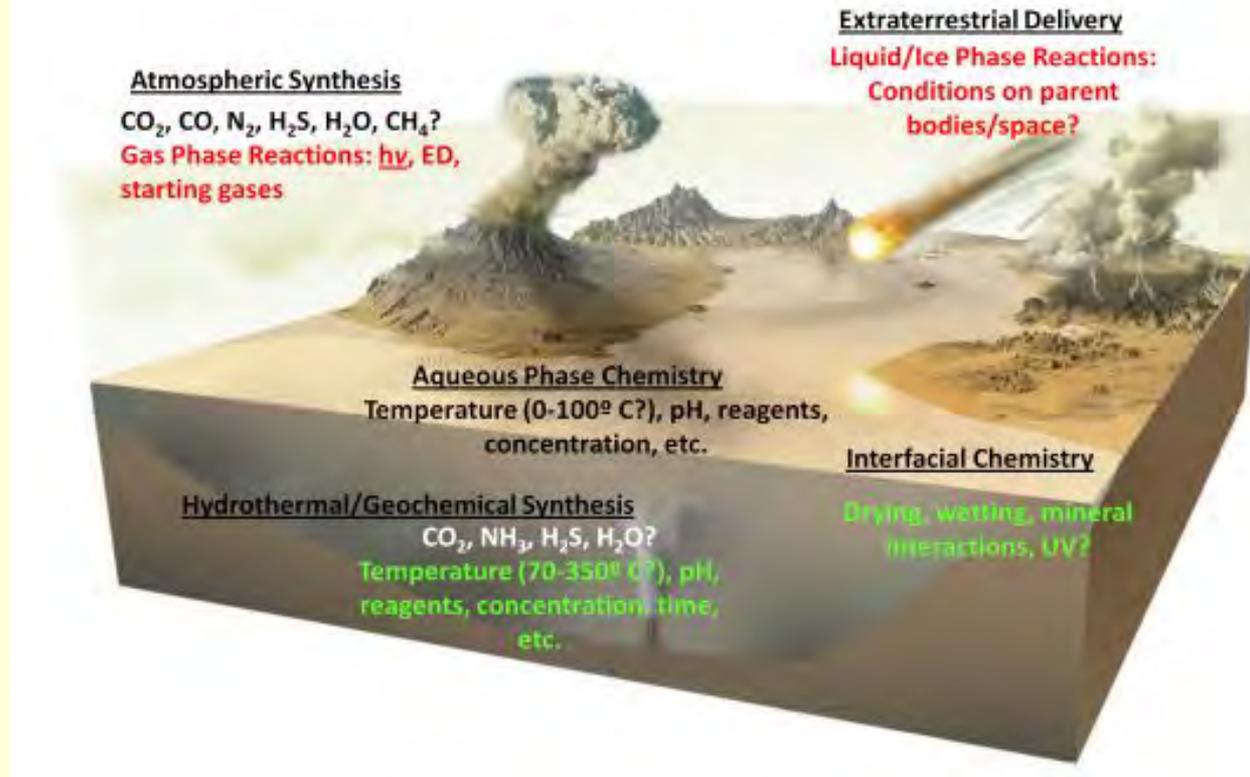
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

L'atmosphère primitive de notre planète aurait été constituée d'un mélange « inhospitalier » des **molécules simples** suivantes:

méthane ( $\text{CH}_4$ ),  
ammoniac ( $\text{NH}_3$ ),  
de vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ),  
de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

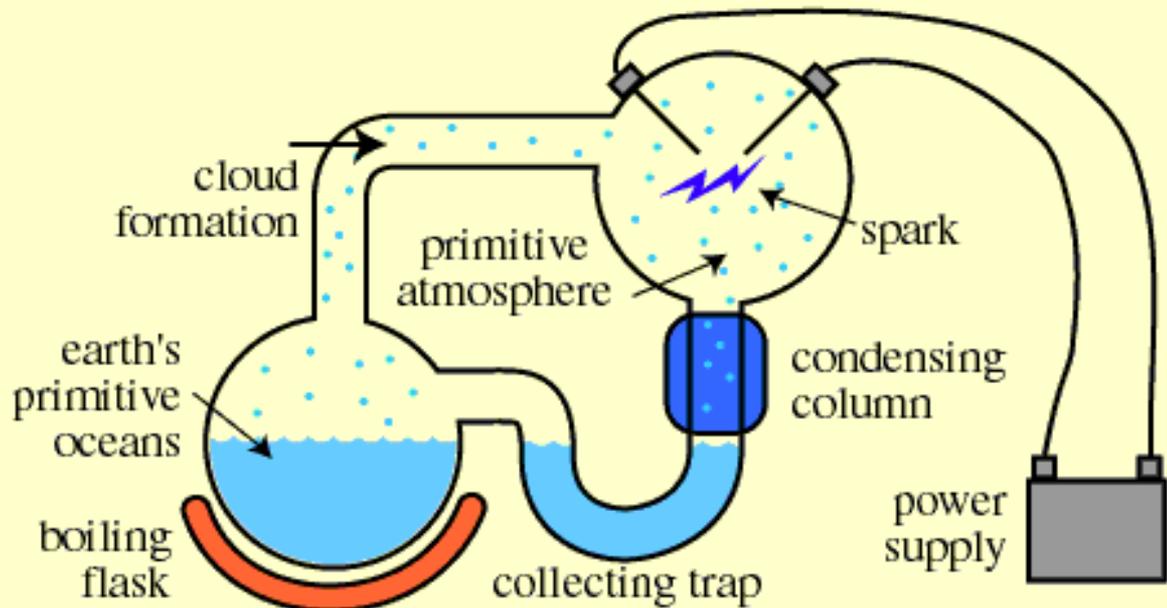


Ces molécules simples ont pu se complexifier jusqu'à un certain point dans les « **mares chaudes** » dont parlait déjà Darwin et qu'on a ensuite appelé « **soupe primitive** ».

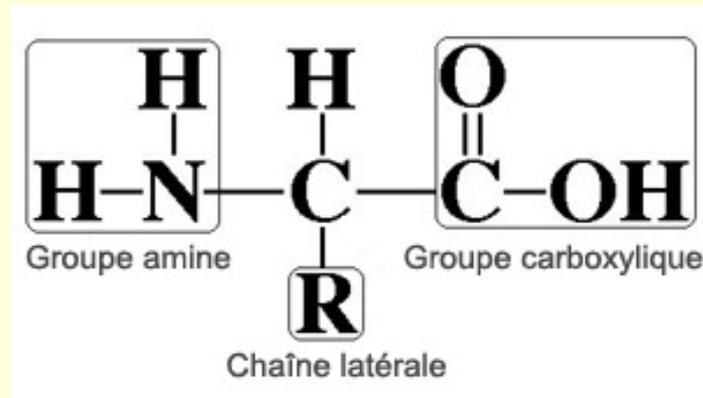


atmosphère et "soupe" primitive

**1953, Miller et Urey :**  
confirment cette hypothèse par une célèbre expérience in vitro où des molécules organiques apparaissent  
(**acides aminés**, etc.)



Note : on parle de **molécules organiques** lorsqu'elles sont formées des atomes suivants : C-H-O-N.



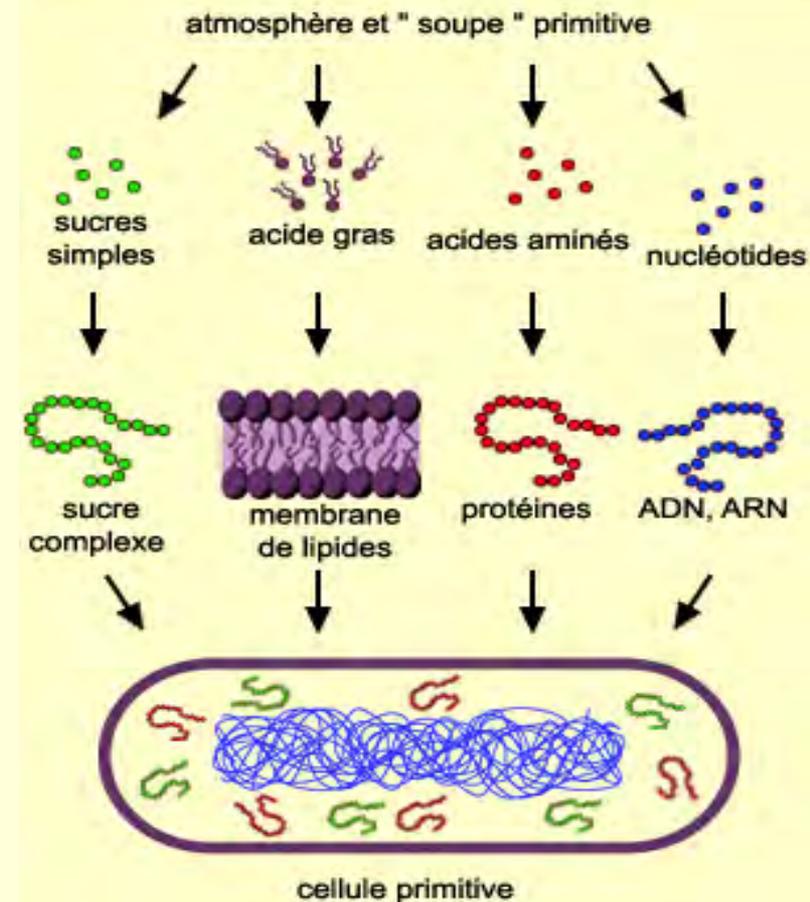


# Un constituant de la vie détecté dans une comète

16 avril 2016 | Pauline Gravel

<http://www.ledevoir.com/societe/science-et-technologie/468358/un-constituant-de-la-vie-detec-te-dans-une-comete>

[...] L'analyse des glaces interstellaires produites en laboratoire a révélé la présence de **différents sucres**, dont le **ribose**, qui est l'un des trois constituants clés de l'**ARN**, l'acide ribonucléique, qui est « *considéré comme le matériel génétique des premiers organismes vivants* ». [...]

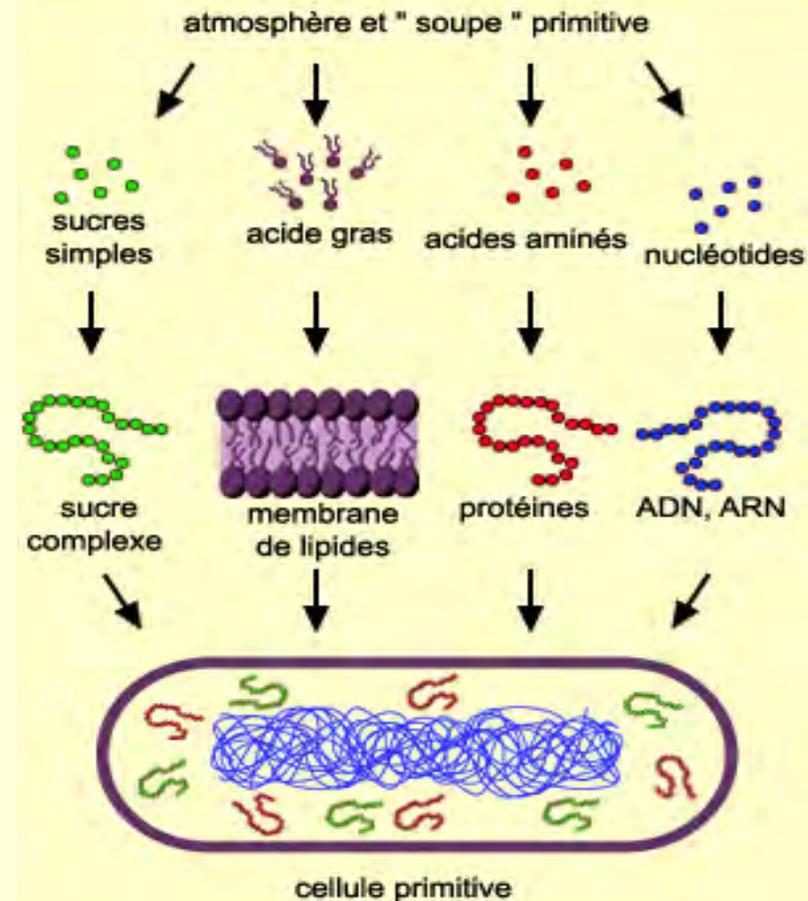


On peut donc dire que le passage de molécules simples vers des molécules organiques comme les acides aminés s'accompagne d'une **croissance de la complexité**.

On parle aussi "**d'auto-organisation**" pour désigner un tel processus.

Et de tels processus chimique d'auto-organisation sont "**sous contrôle thermodynamique**",

c'est-à-dire qu'ils se produisent "spontanément" sans l'intervention de forces extérieures si les bonnes conditions de départ sont réunies.



## Pourquoi apparaît la vie ?

Et la réponse pourrait bien être pas très différente de  
“pourquoi il y a des molécules ou des macro-molécules ?”

Autrement dit, ces bonnes vieilles  
**lois de la thermodynamique**  
qui pourraient encore contrôler l'affaire...

# Le BLOGUE du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Lundi, 29 décembre 2014

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/12/29/3936/>

Jeremy England, physicien de 33 ans, pense que les organismes vivants existent parce qu'ils ont simplement tendance à **mieux capturer l'énergie de leur environnement et à la dissiper sous forme de chaleur**, conformément au deuxième principe de la thermodynamique.

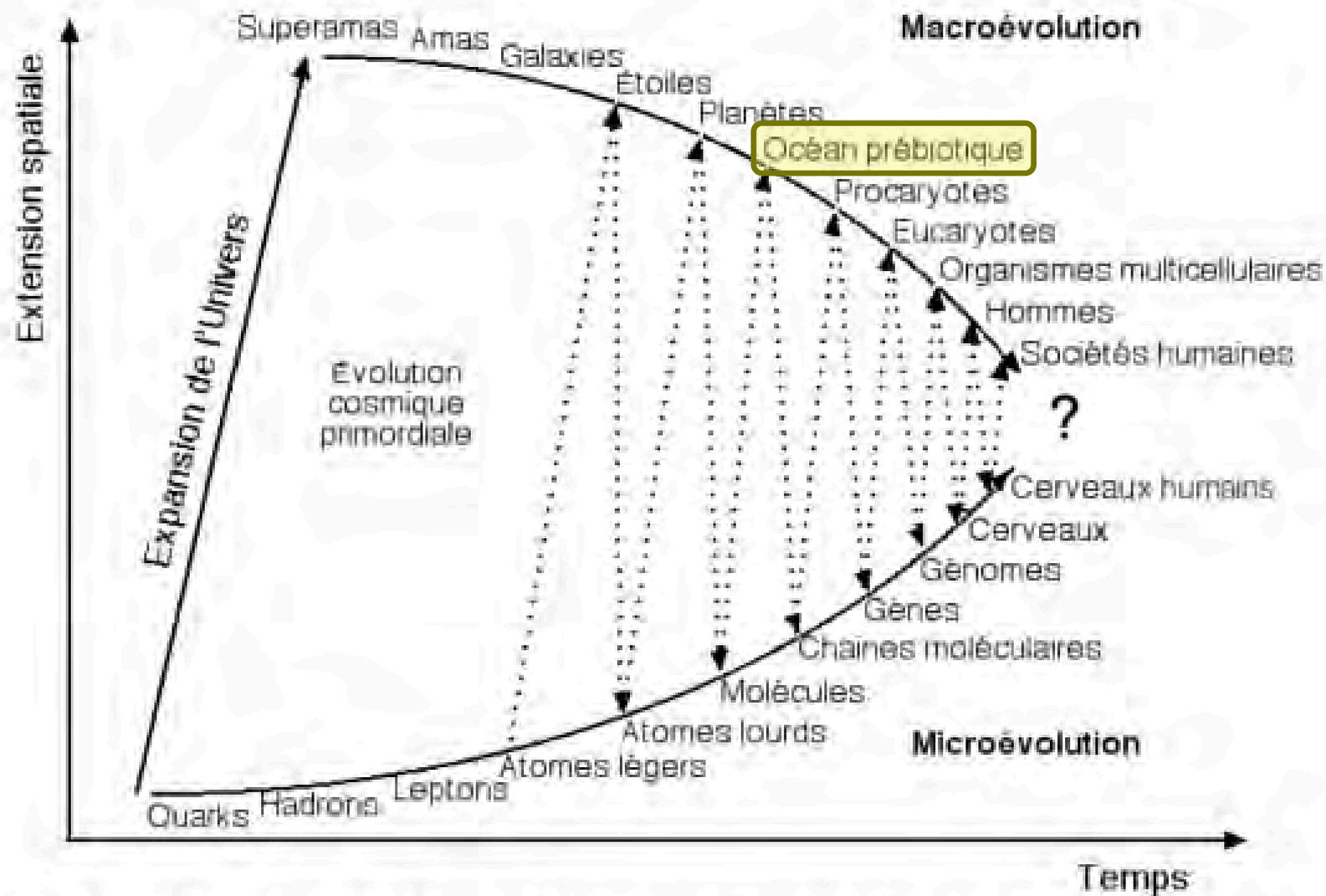


## 4<sup>E</sup> HEURE : Concepts et modèles

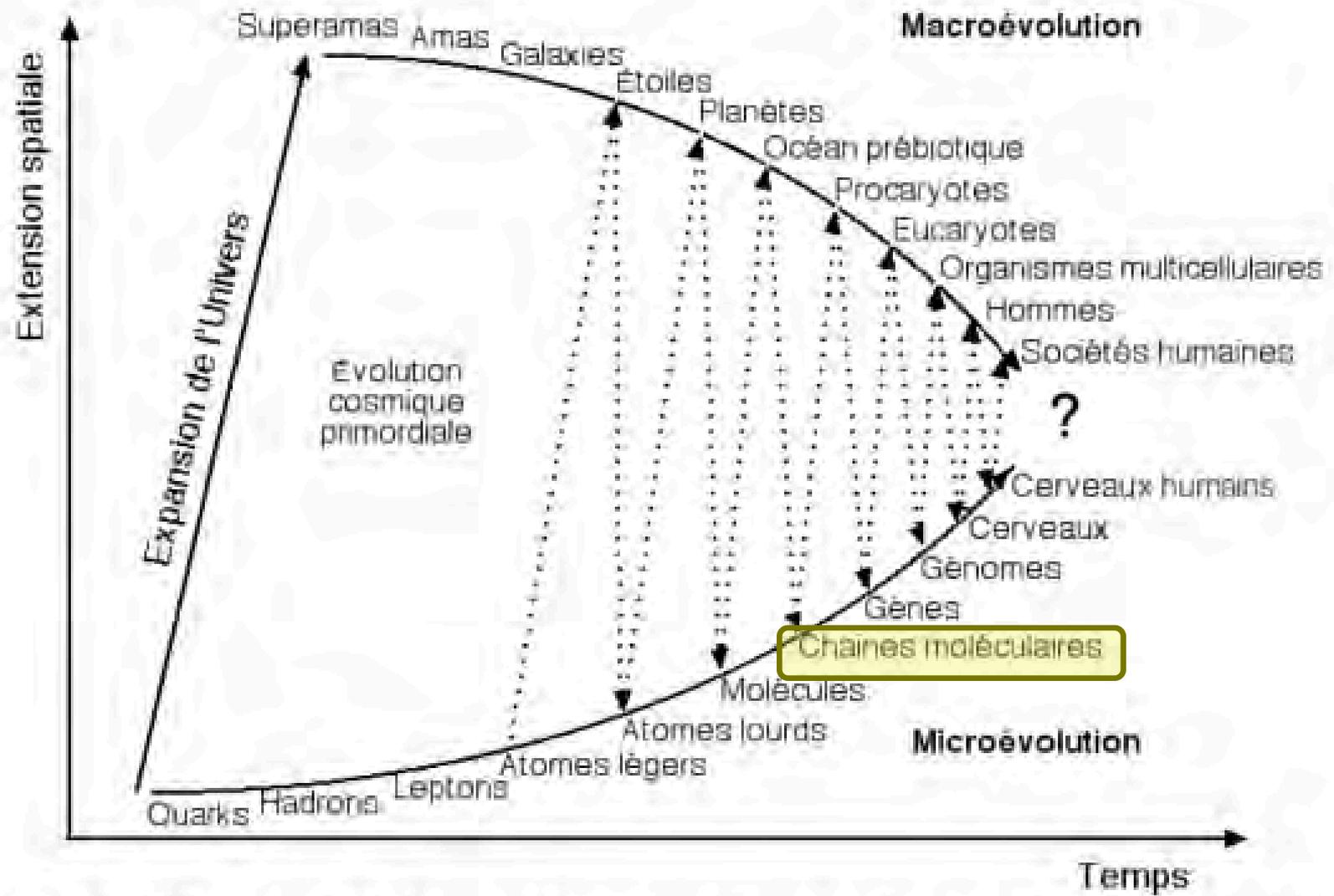
Contrôle de l'attention :  
"bottom up" et "top down"

Inconscient et conscience

Codage prédictif  
(« predictive processing »)



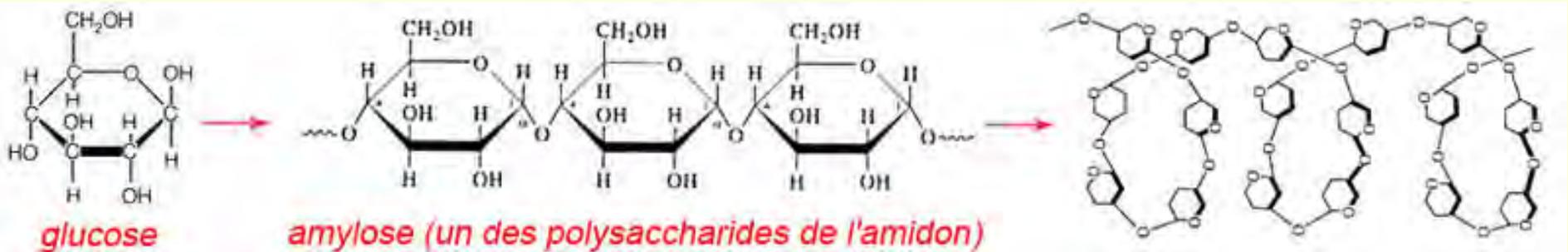
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



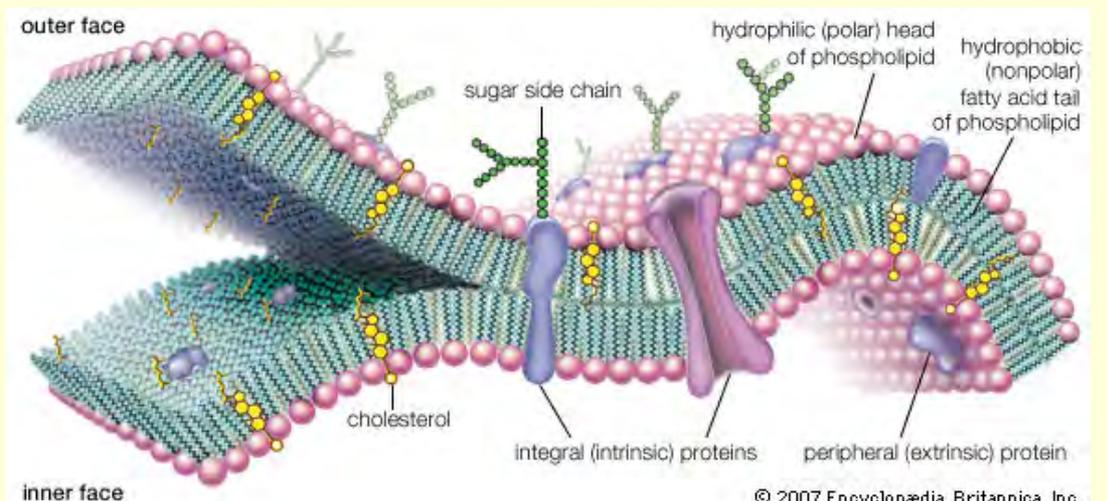
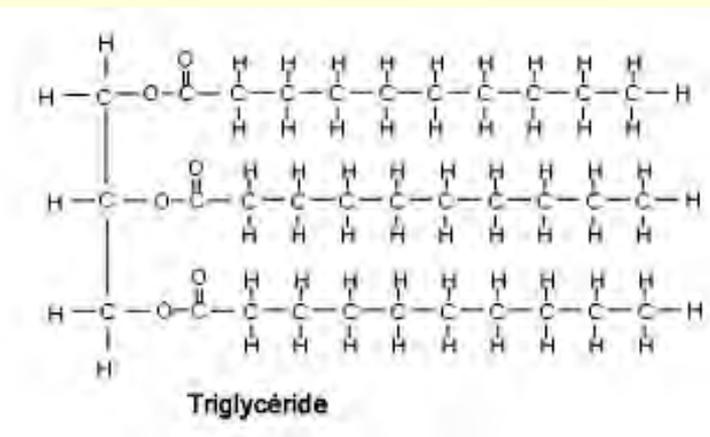
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

Quoi qu'ait pu être ses mécanismes, cette évolution chimique va donner lieu à des chaînes moléculaires de :

- Glucides



- Lipides





Ces chaînes de lipides vont donner lieu à des phénomènes **d'auto-organisation** mais cette fois-ci au niveau **supra-moléculaires** :

par exemple, des **couches bi-lipidiques**

qui vont former à leur tour des **vésicules** qui deviendront les futures membranes cellulaires.

“there is an overall increase of entropy (or disorder) due to the “liberation” of water molecules, which makes the process **thermodynamically favorable.**”

- The Systems View of Life

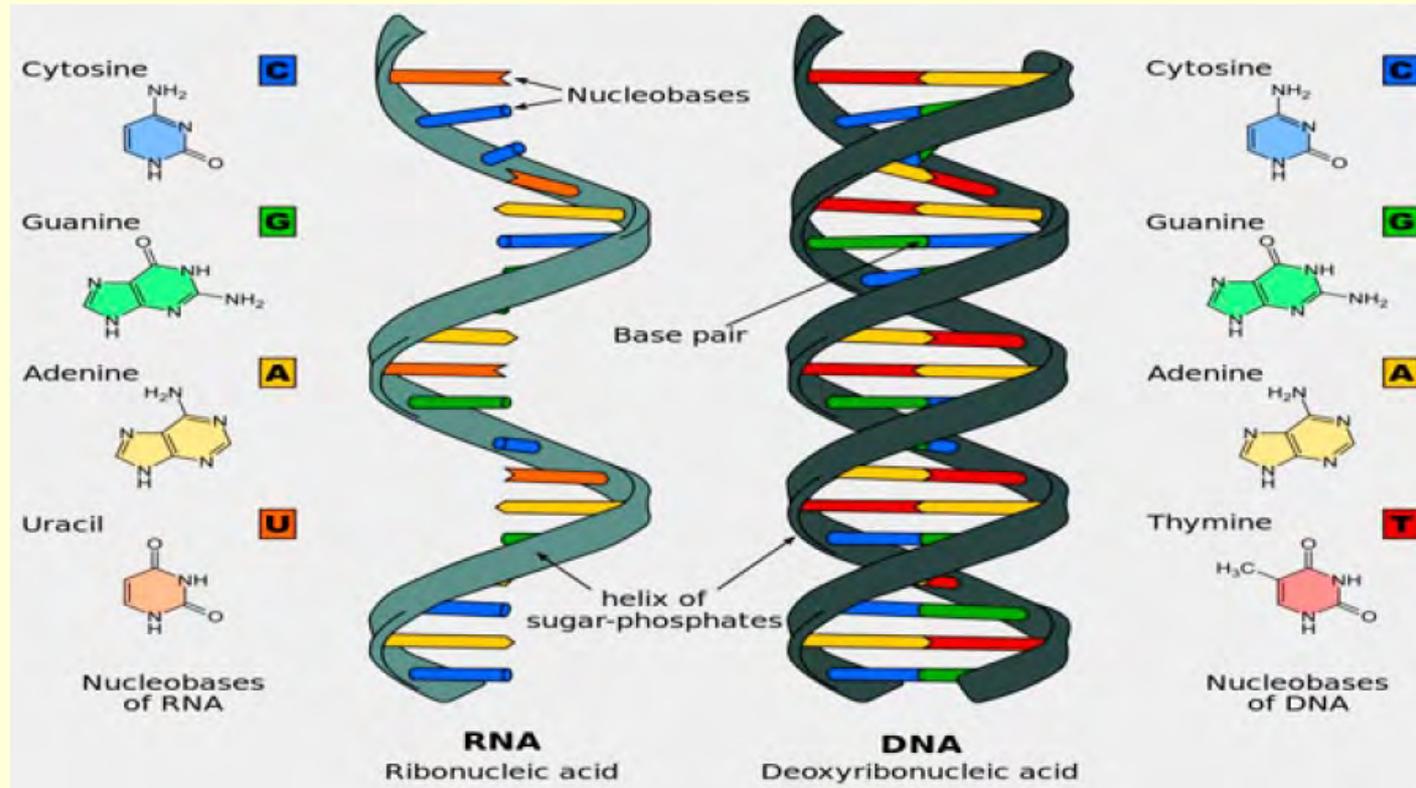


« Pas de membrane, pas de cellules.  
Pas de cellules, pas de neurones.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »

Car encore aujourd'hui,  
chaque cellule de  
votre cerveau possède  
une membrane.

...cette évolution chimique va donner lieu à des chaînes moléculaires de :

- Glucides
- Lipides
- **Bases nucléiques**

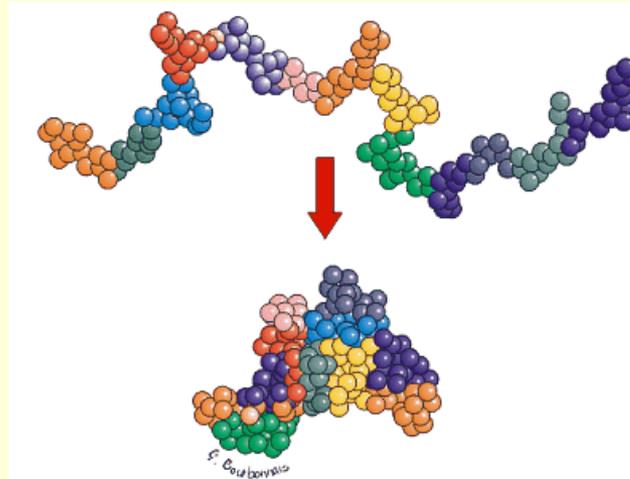
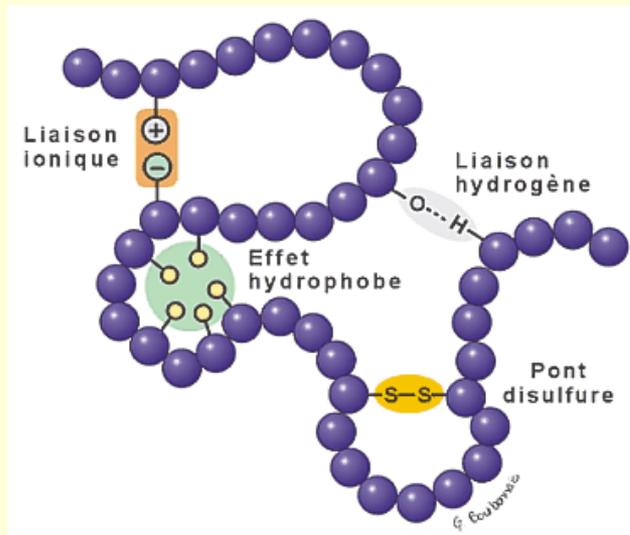
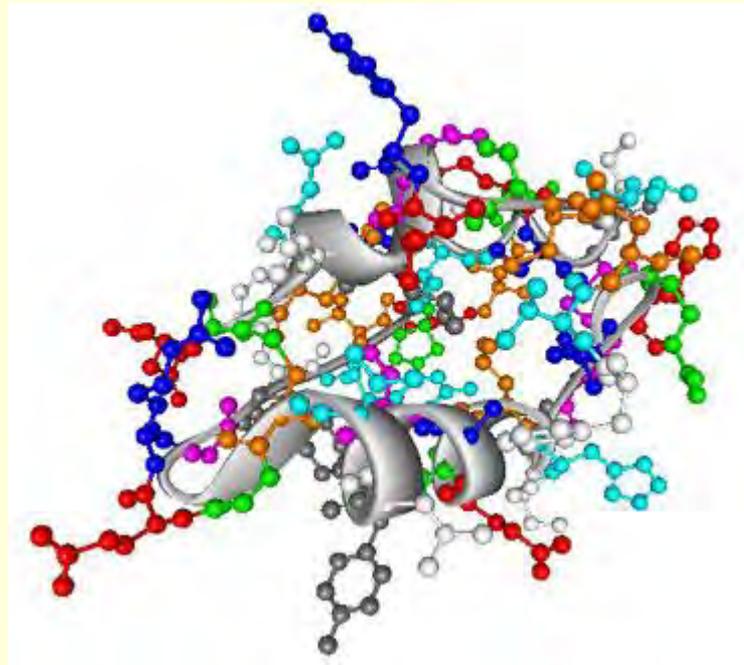


**Même principe d'organisation que pour les lipides:**

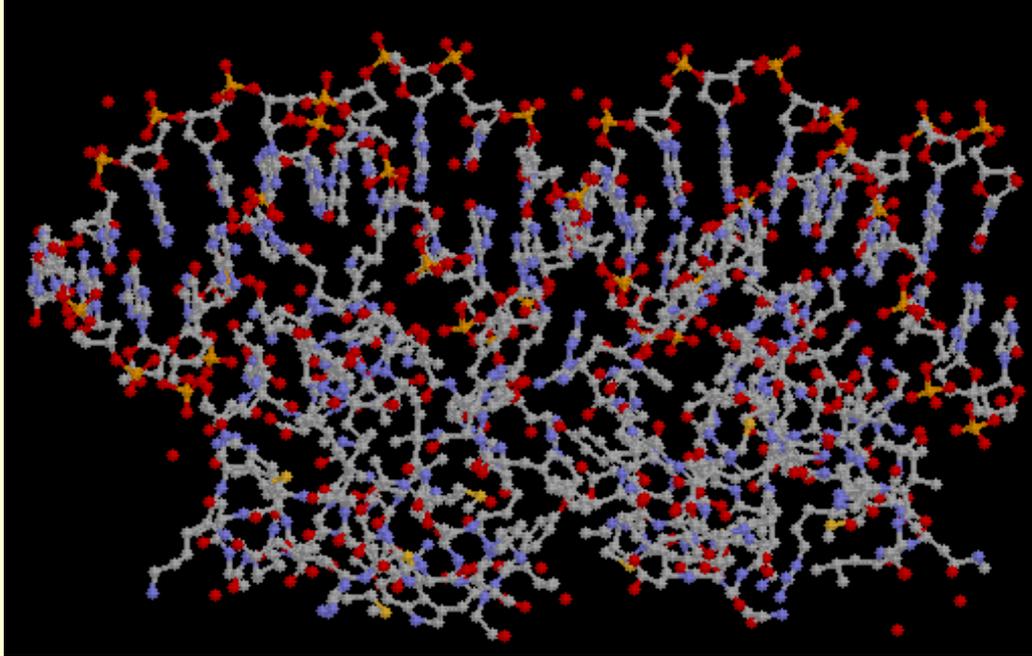
les deux brins complémentaires d'AND forment un duplex dans lequel les bases nucléiques hydrophobiques complémentaires fuient le contact de l'eau, laissant les "doigts" hydrophiliques des groupes phosphates s'occuper de la solubilité avec l'eau...

...cette évolution chimique va donner lieu à des chaînes moléculaires de :

- Glucides
- Lipides
- Bases nucléiques
- **Protéines**



Le repliement de la chaîne d'acides aminés est déterminé par la séquence primaire des acides aminés de la protéine (la suite des « perles » dans le « collier de perles »).



On peut donc dire encore une fois que **ce repliement s'auto-organise** (toujours sous contrôle thermodynamique), amenant « l'émergence » de nouvelles propriétés fonctionnelles au niveau de la structure 3D de la protéine (site de liaison d'un enzyme, le pore d'un canal membranaire, etc...) :

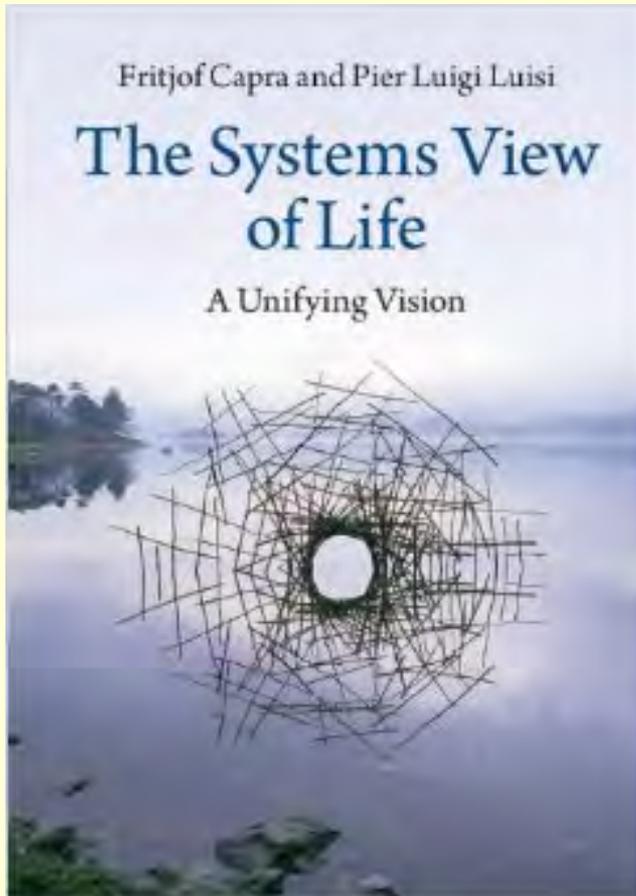
Et Chris Anfinsen a démontré en **1954** que ce repliement spontané à partir de la structure primaire de la protéine est aussi le plus stable thermodynamiquement.

Si l'on **dénature** une protéine avec de l'**urée**, ce qui change sa forme et lui fait perdre sa fonction biologique, le retrait de l'urée amène la protéine à reprendre sa forme originale.

Rappel :

Les « macro-molécules » qui formeront les organismes **vivants** sont donc constituées des **mêmes atomes** **que ceux que l'on retrouve dans la matière inanimée.**

Les molécules organiques ne vont pas se distinguer par la nature de leurs constituants, mais bien **au niveau de leur arrangement, de leur structure, bref leur forme.**

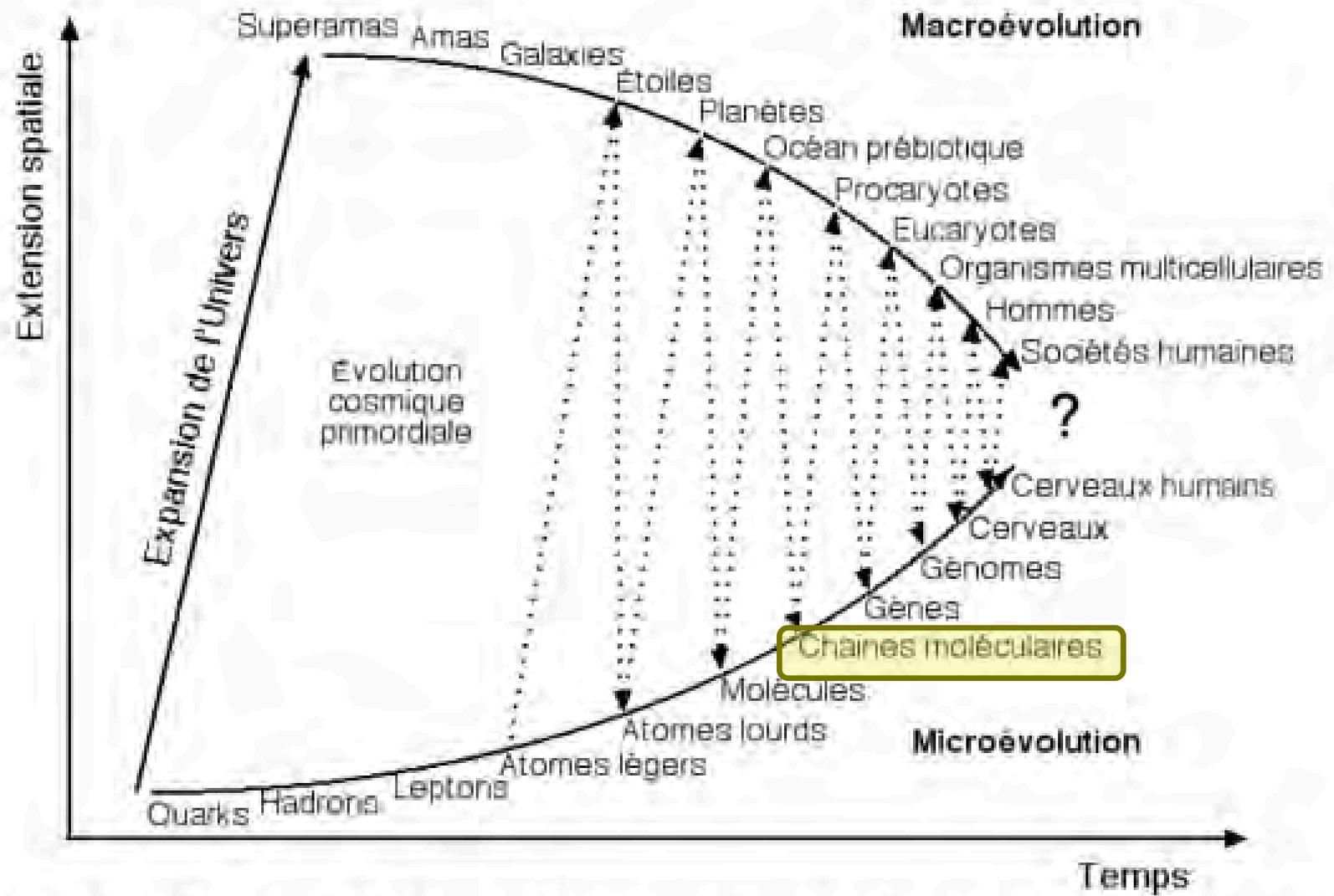


Durant l'histoire occidentale de la science et de la philosophie, il y a eu une tension entre 2 perspectives :

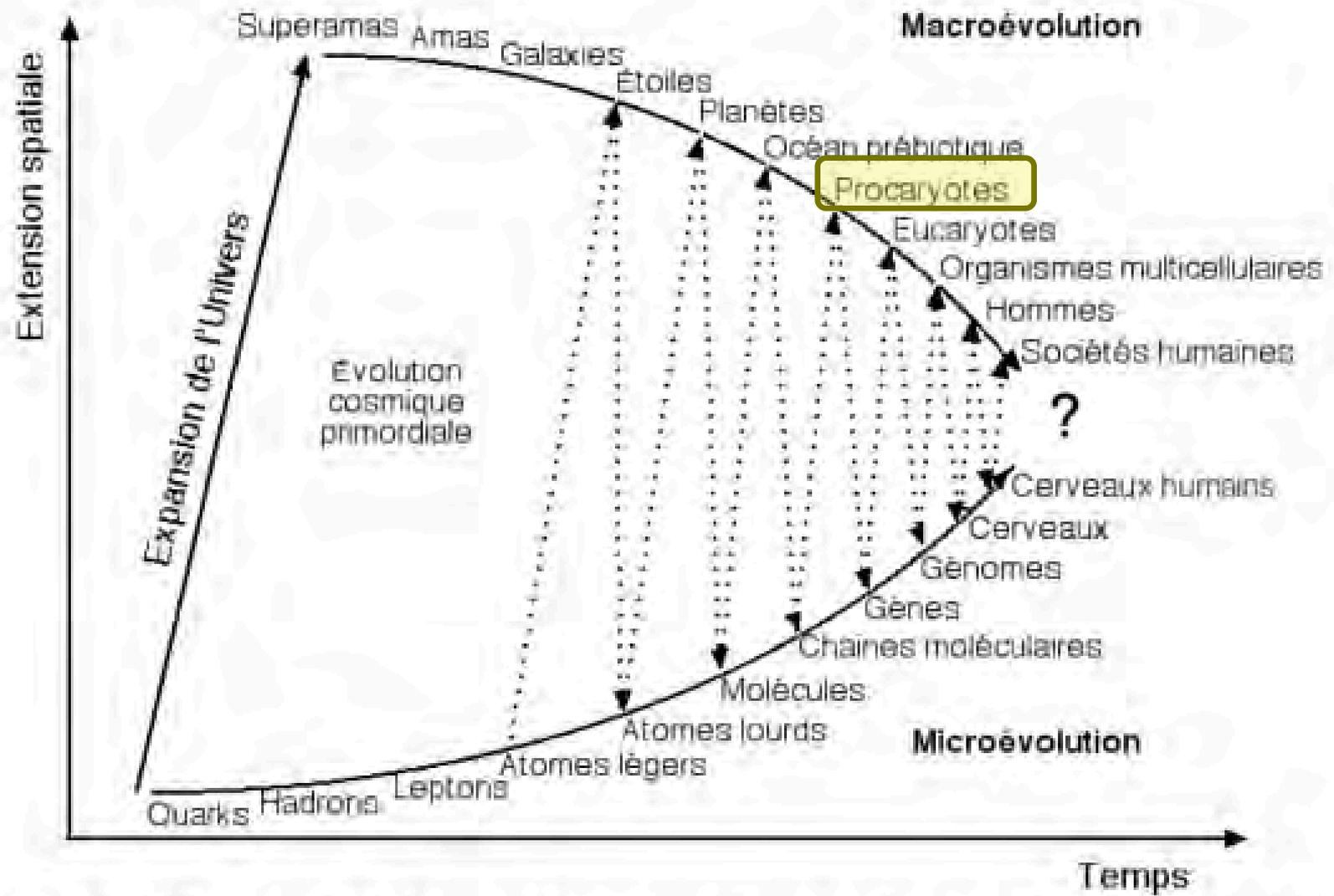
- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?
- l'étude de la **forme** : quel est le pattern ?

Parce que ça commence à devenir important avec le repliement des protéines,

Et ça va devenir fondamental avec les premières cellules...



D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



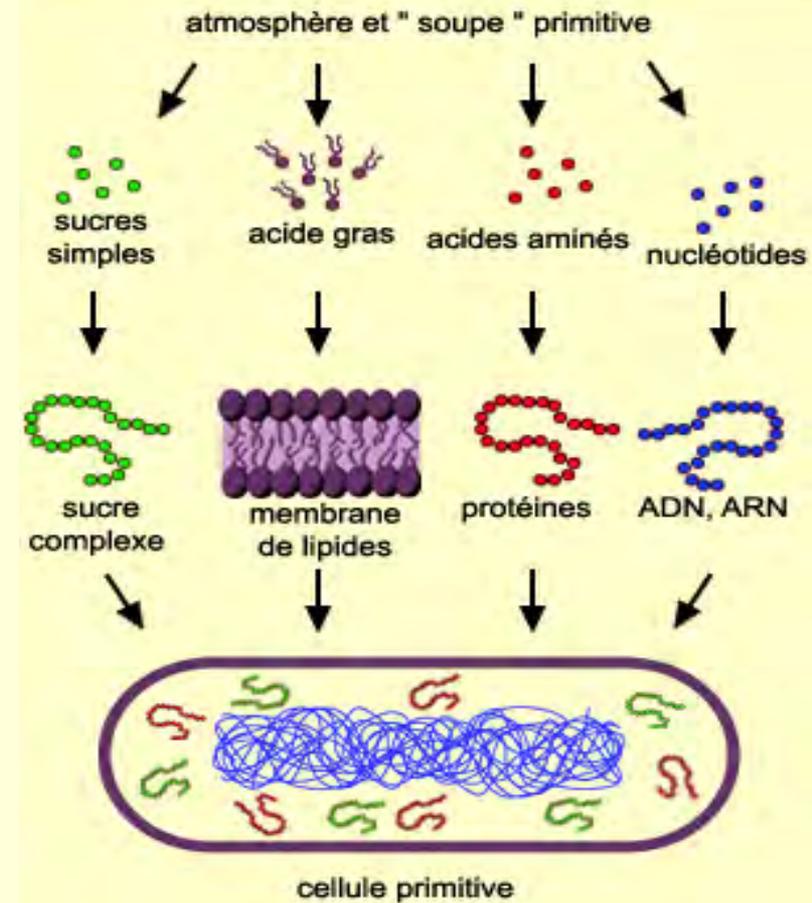
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



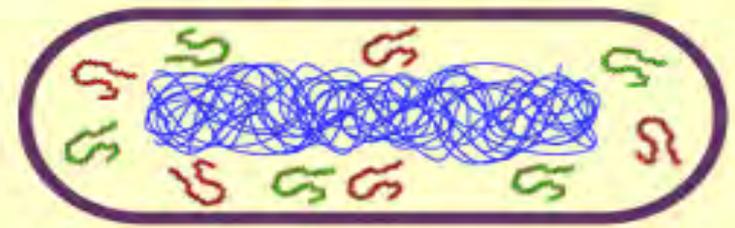
« Avec le temps, tout devient possible.

La nature n'en manque jamais. »

- Lamarck

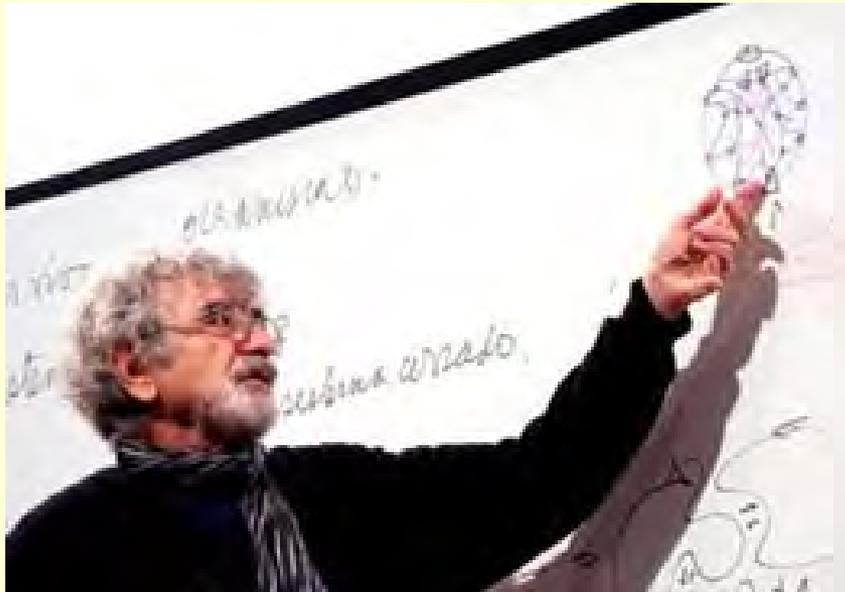


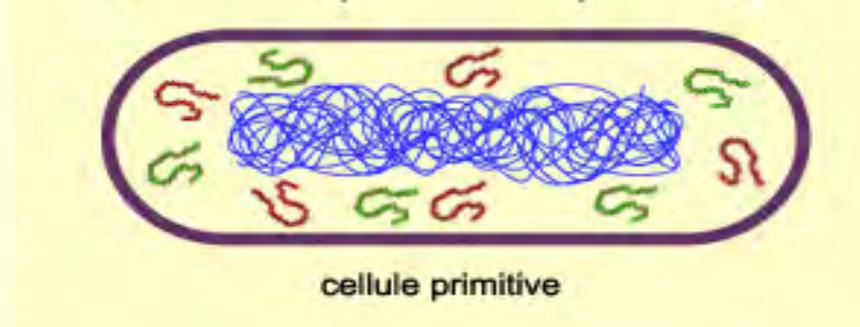
Pour comprendre ce qu'est une **cellule vivante**,



cellule primitive

une notion très utile est celle d'autopoïèse,  
élaborée par Humberto Maturana et Francisco Varela  
dans les années 1970.



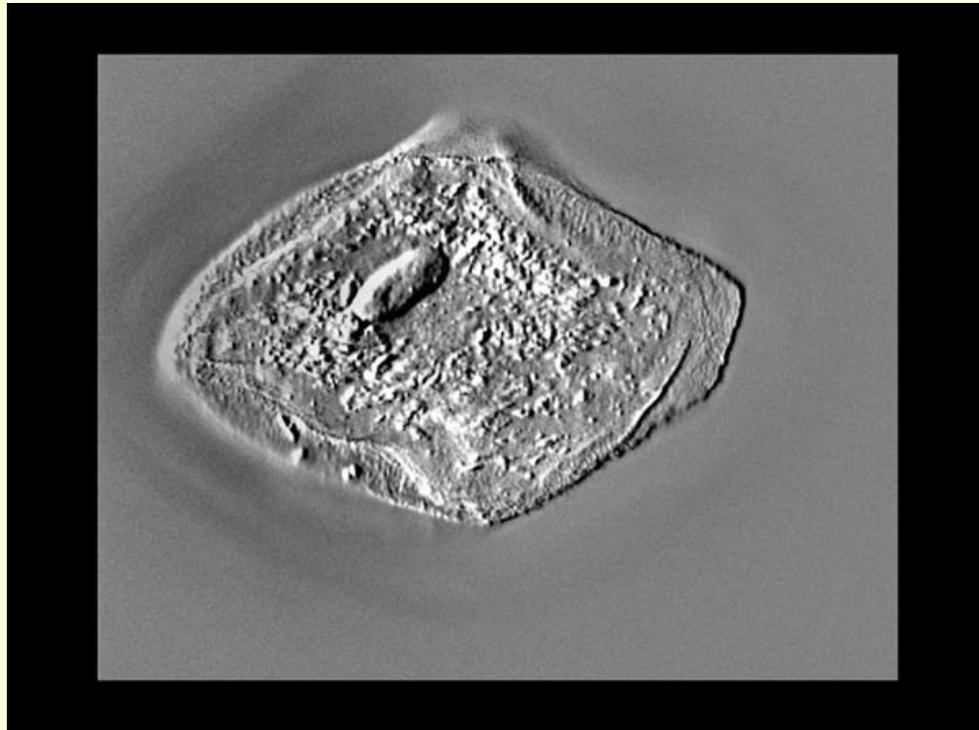


une notion très utile est celle d'autopoïèse,  
élaborée par Humberto Maturana et Francisco Varela  
dans les années 1970.

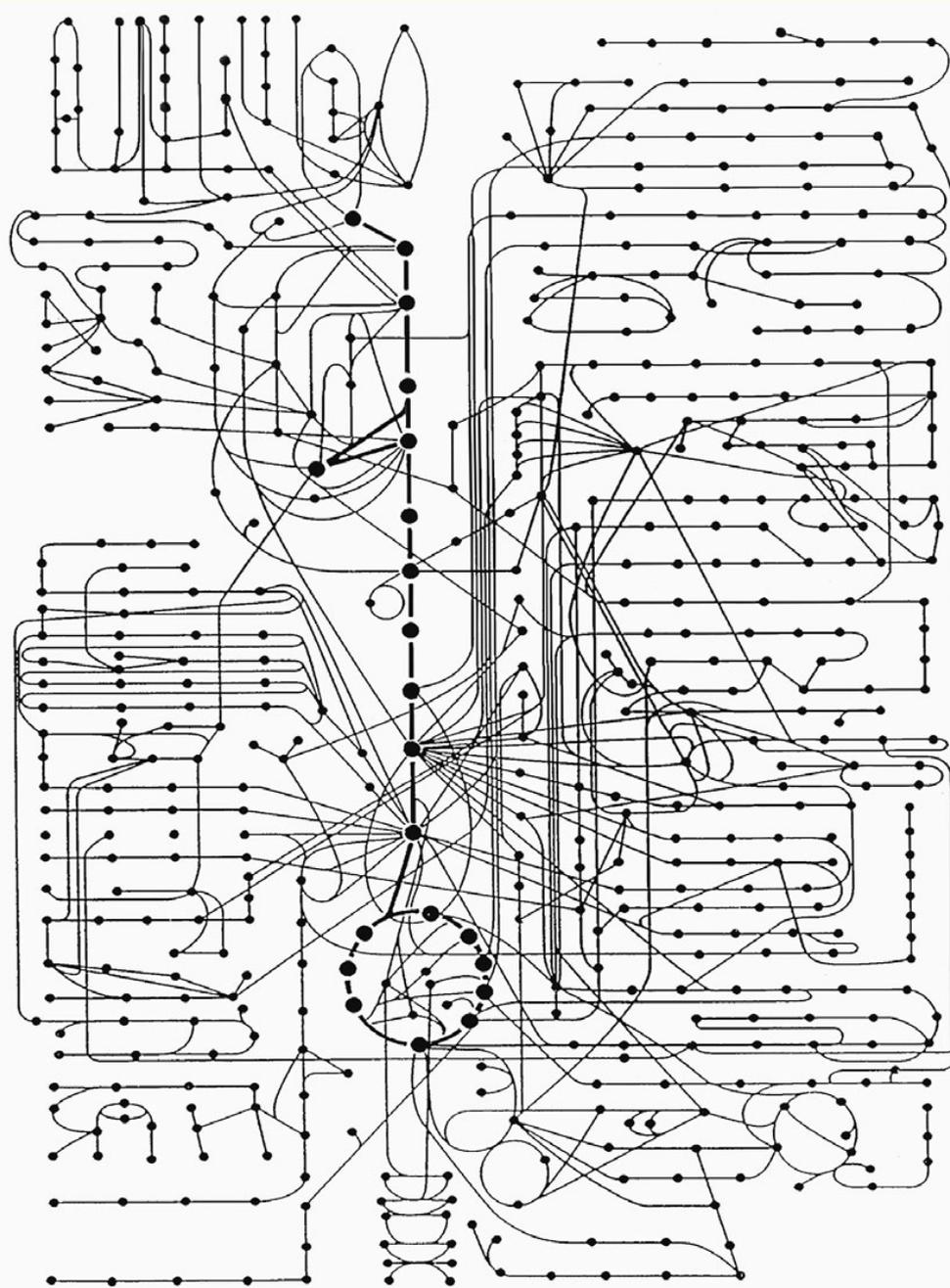
« Notre proposition est que les être vivants sont caractérisés par le fait que, littéralement, ils sont continuellement en train de **s'auto-produire**. »

- Maturana & Varela, *L'arbre de la connaissance*, p.32

« Un système autopoïétique est un **réseau complexe d'éléments** qui, par leurs interactions et transformations, **régénèrent constamment le réseau** qui les a produits. »

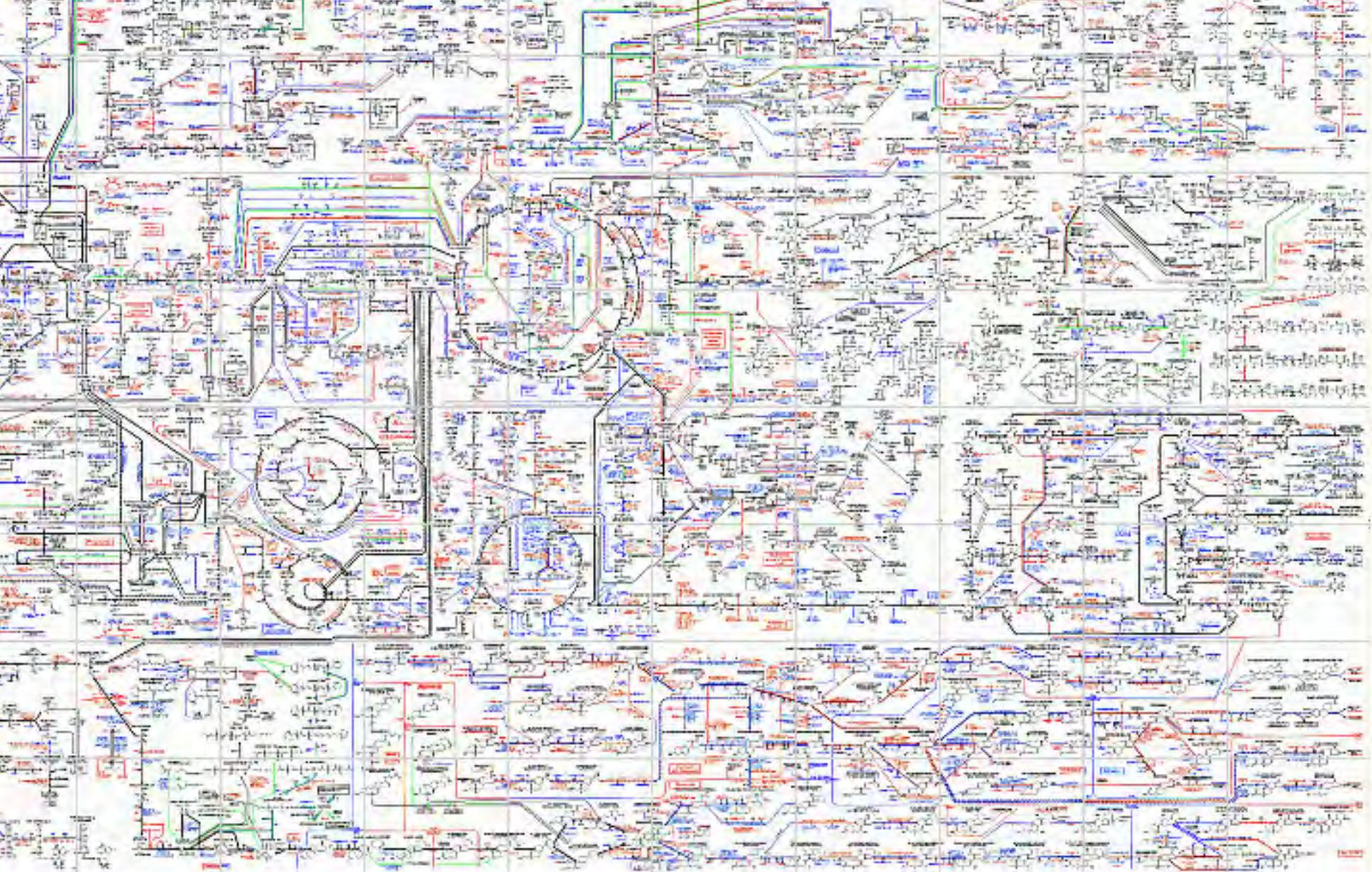


An image of a human buccal epithelial cell obtained using Differential Interference Contrast (DIC) microscopy  
([www.canisius.edu/biology/cell\\_imaging/gallery.asp](http://www.canisius.edu/biology/cell_imaging/gallery.asp))



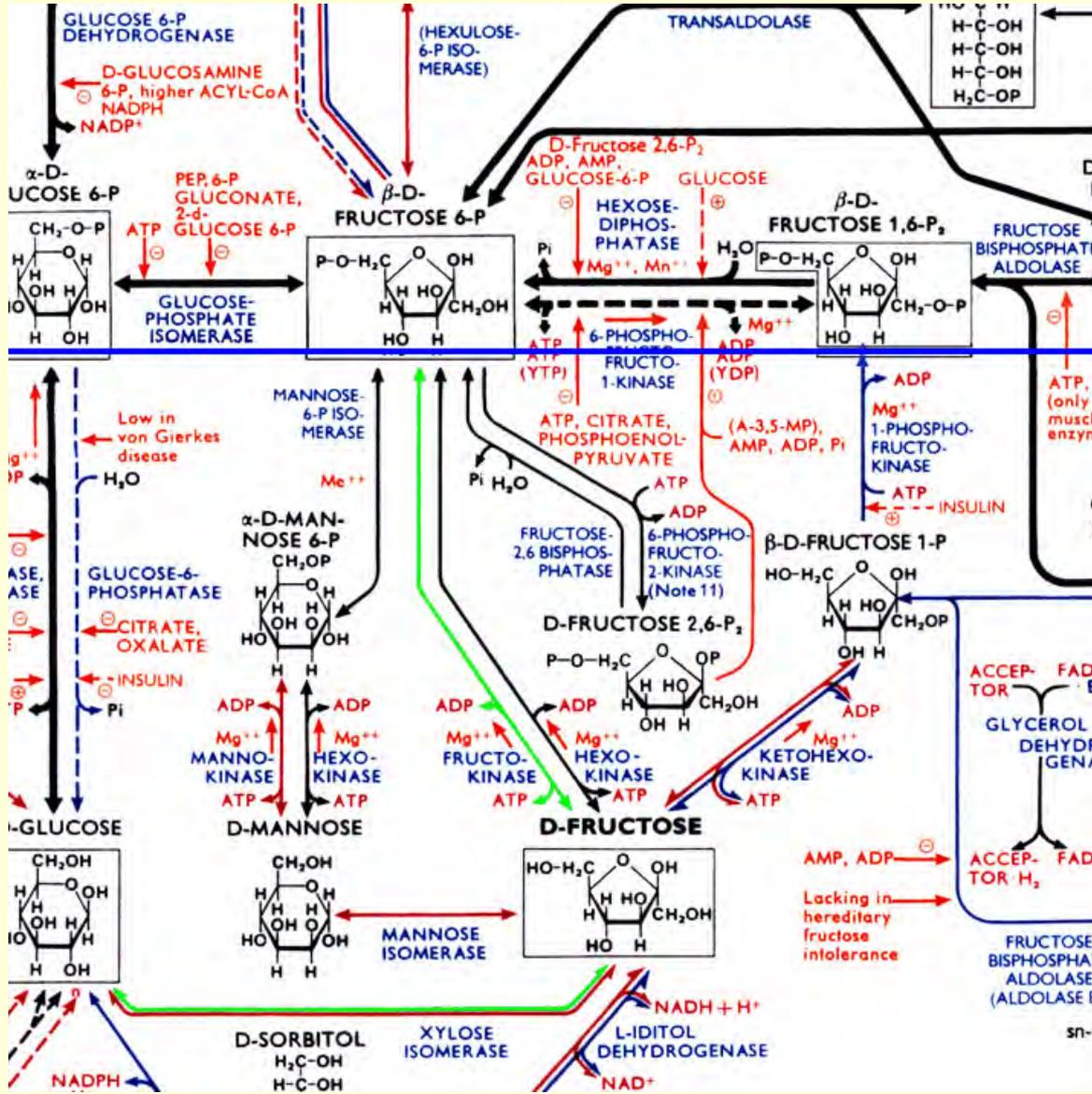
« un réseau »...

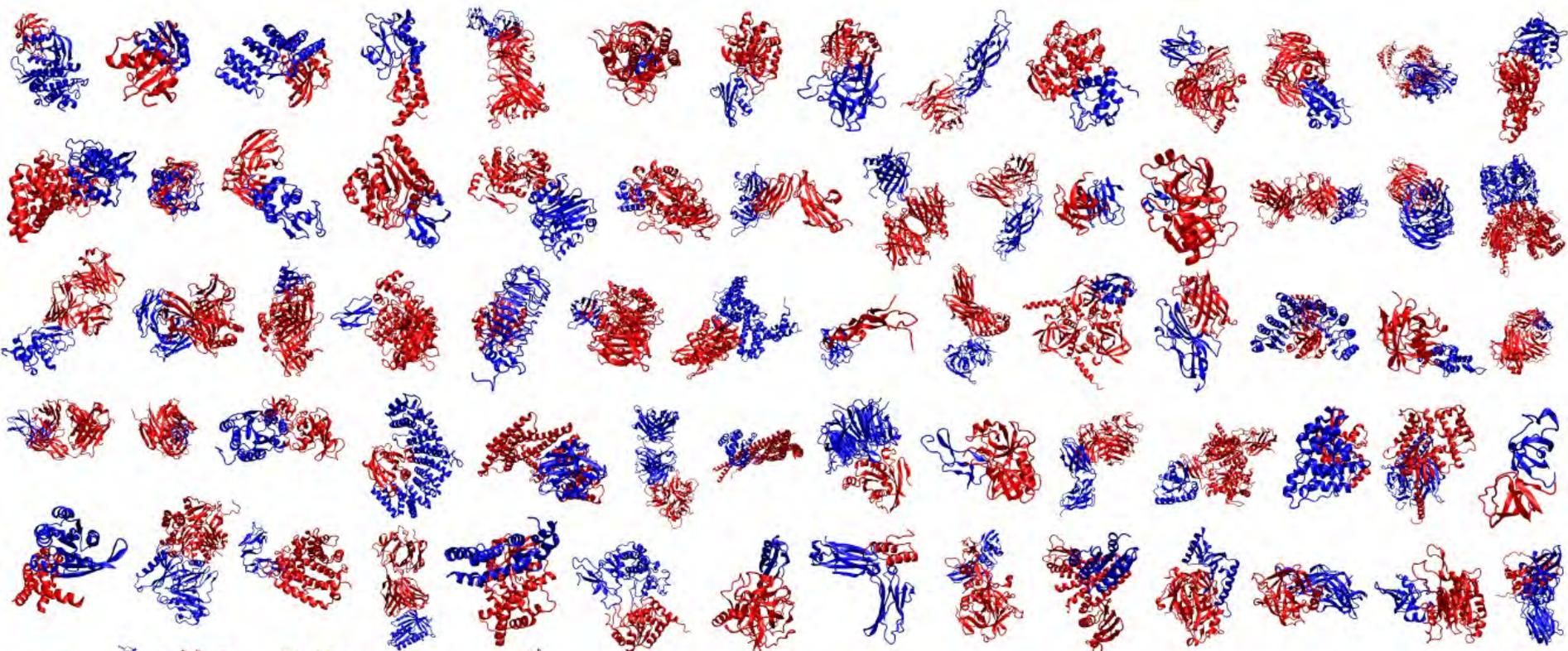
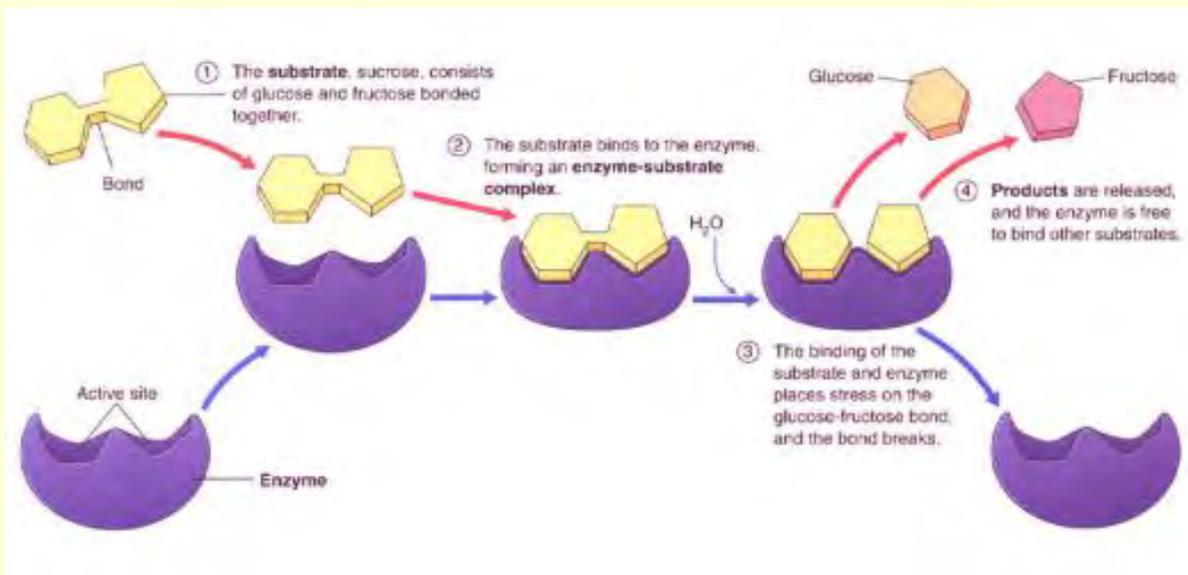
= des éléments qui entretiennent  
des relations



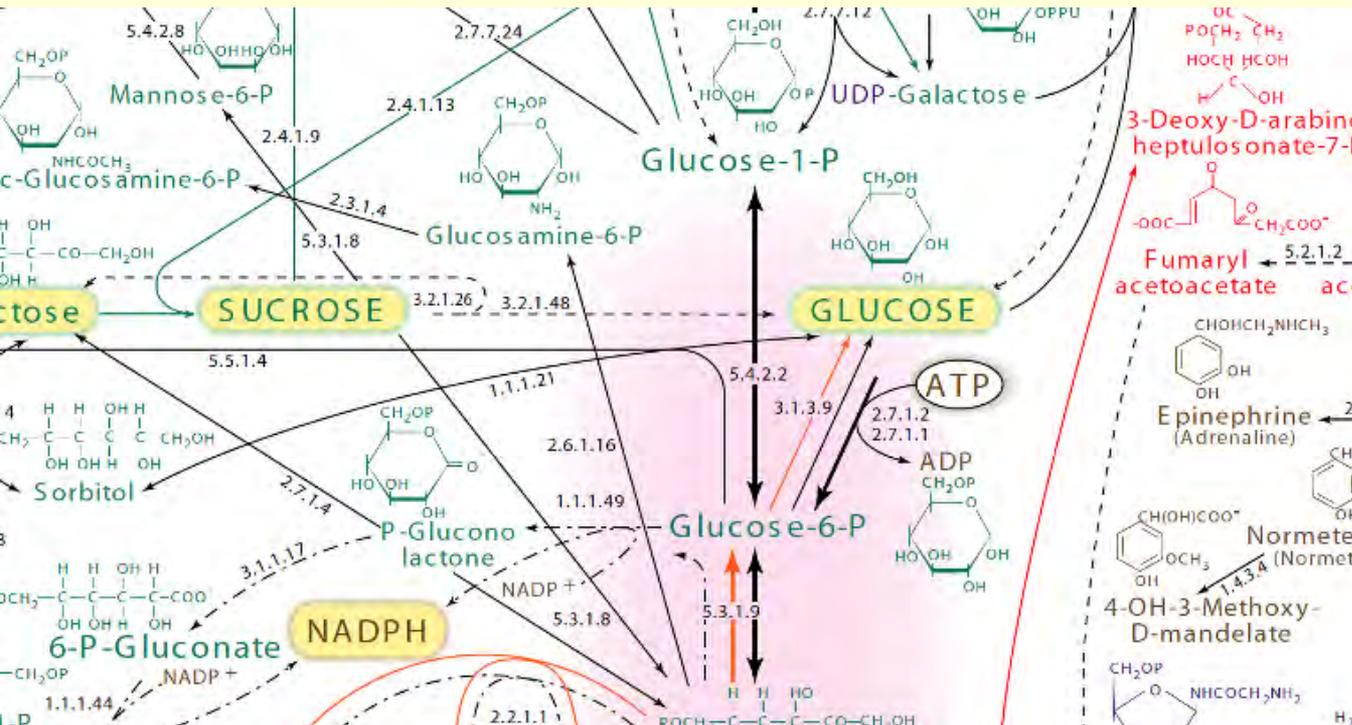
« un réseau complexe »... = cascades de réactions biochimiques dans une cellule

« un réseau complexe d'éléments »... : enzymes (protéines), ADN, etc.





« un réseau complexe d'éléments »... : enzymes (protéines), ADN, etc.

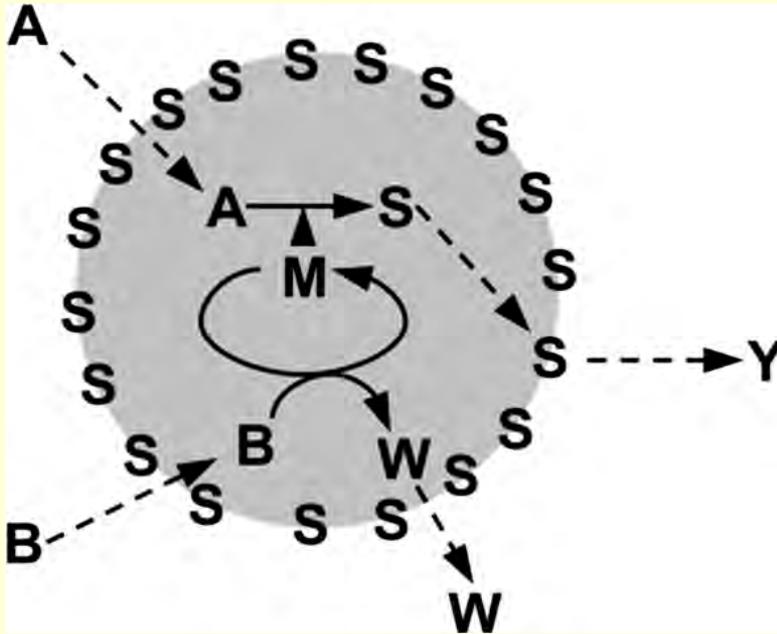


..qui régénèrent constamment, par leurs interactions et transformations, le réseau qui les a produits.



« Pas de métabolisme, pas de cellules.  
Pas de cellules, pas de neurones.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »

Car encore aujourd'hui, chaque cellule de votre cerveau a un tel métabolisme.



<http://www.humphath.com/spip.php?article17459>

Toute cellule est donc un **système ouvert** (du point de vue thermodynamique), qui :

- a besoin de nutriments
- rejette des déchets
- construit sa propre **frontière** et tous ses **composants internes**, qui vont eux-mêmes engendrer les processus qui produisent tous les composants, etc.

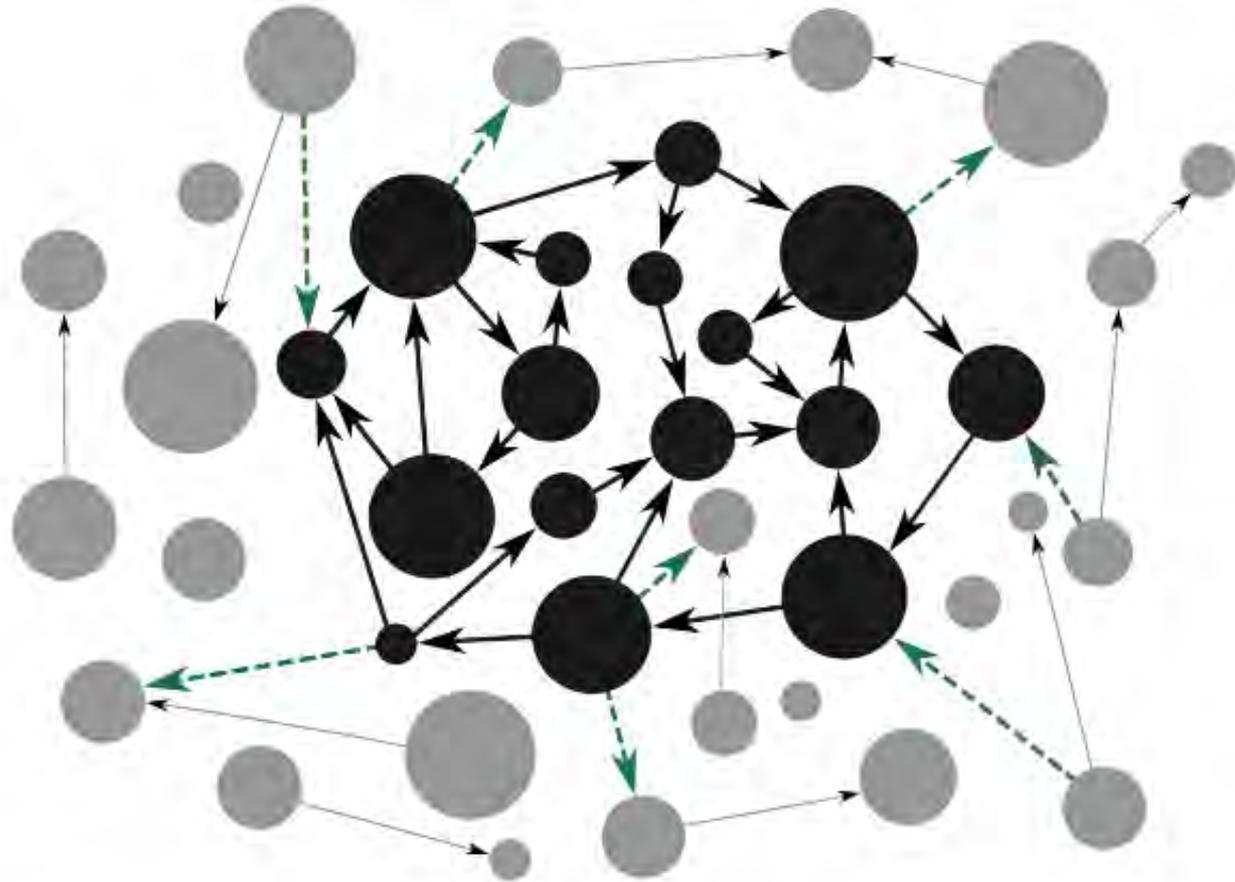
(mais le système est **fermé** du point de vue **opérationnel**)

Varela parle de  
« **clôture  
opérationnelle** »,  
des systèmes vivants

car elle ne se confond  
évidemment pas avec  
une paroi étanche.

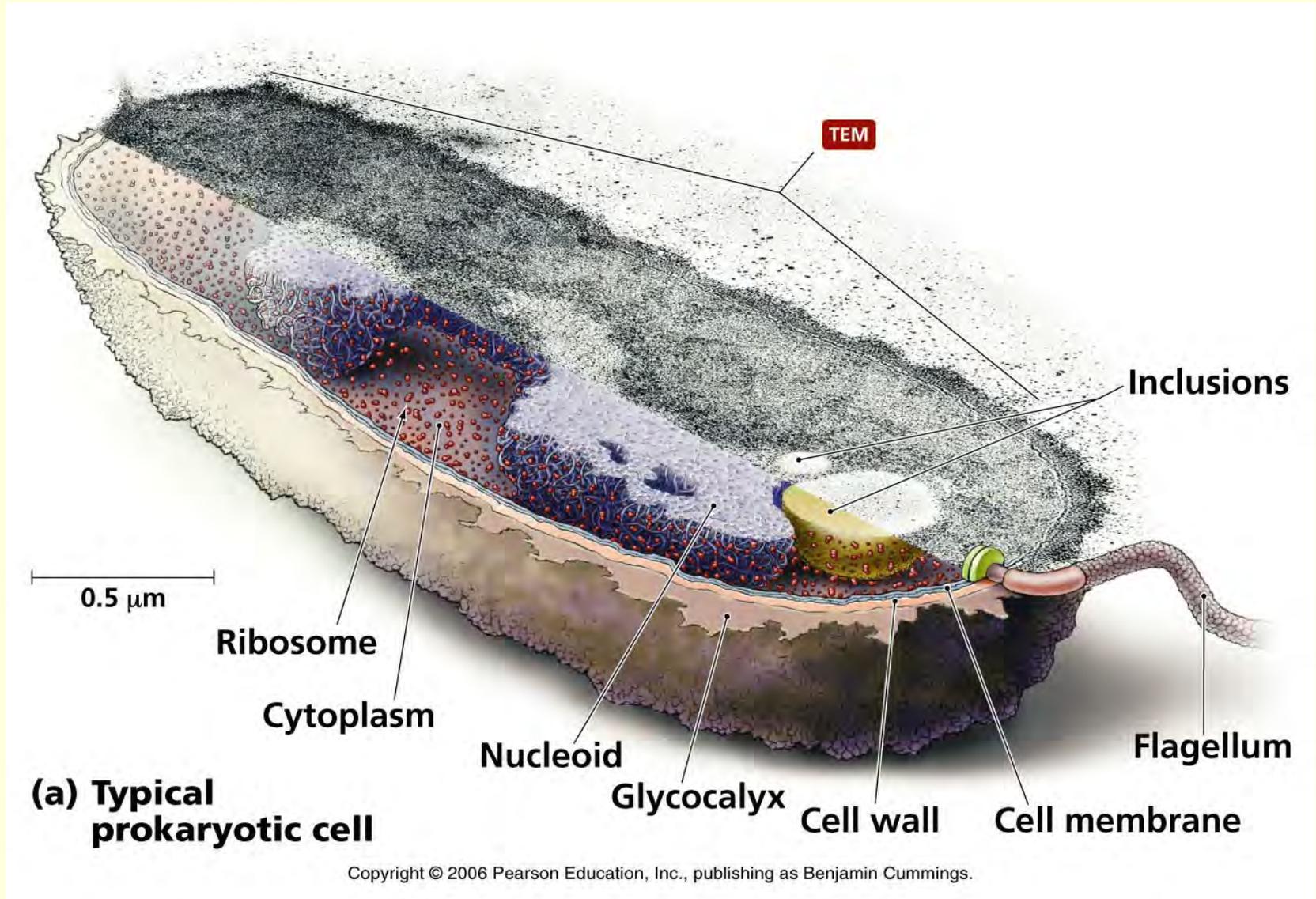
**En noir** : une cellule

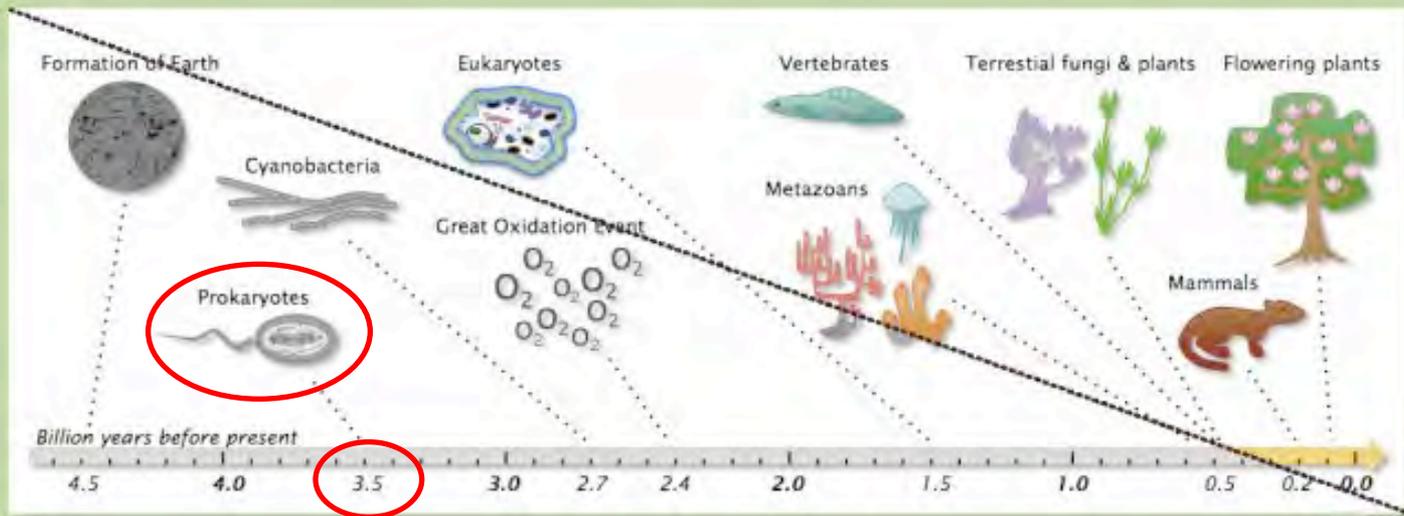
(des molécules se  
fixent sur sa  
membrane, des ions  
traverse cette  
membrane, etc.)



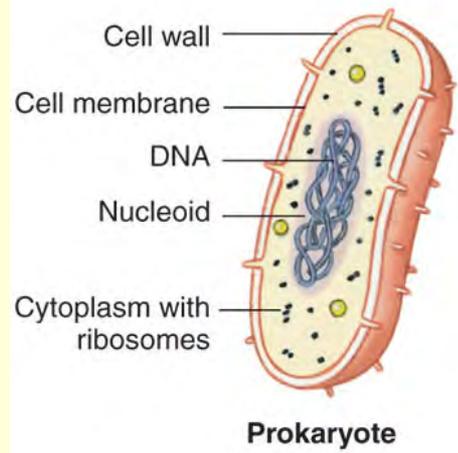
Copyright Ezequiel Di Paolo, 2013. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License.  
[http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en\\_US](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en_US)

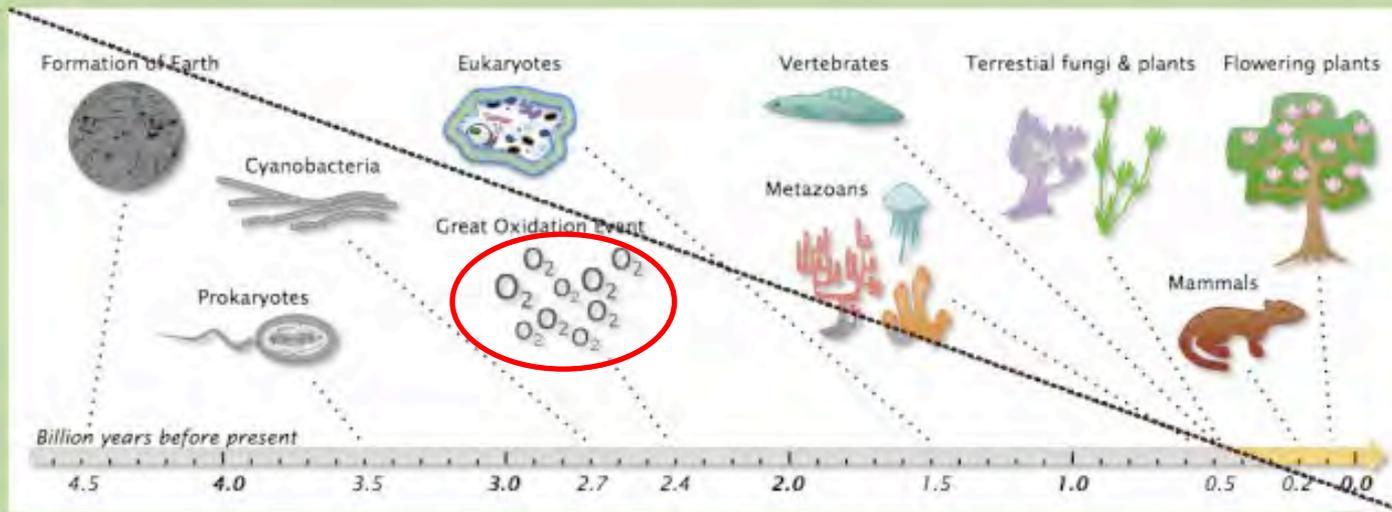
Les premières cellules vivante sont déjà infiniment complexes !





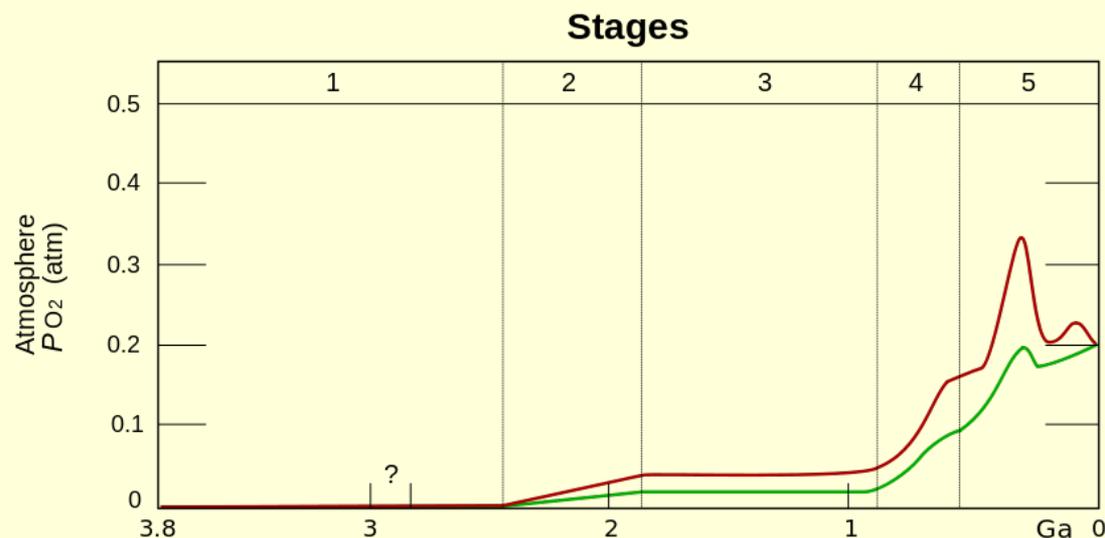
Copyright © The McGraw-Hill Co

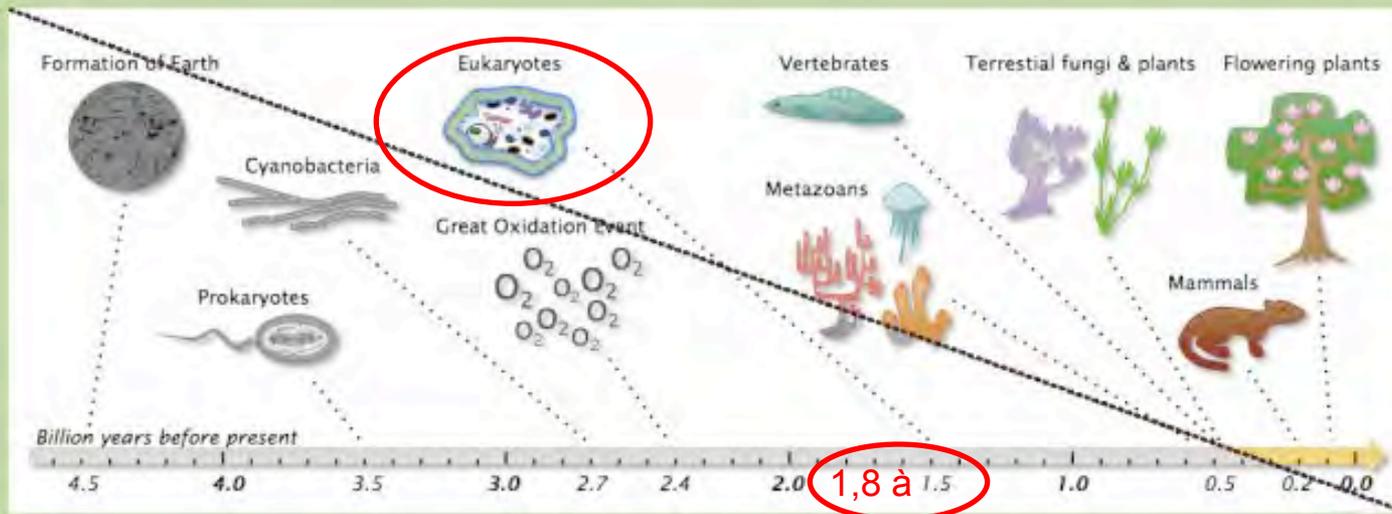




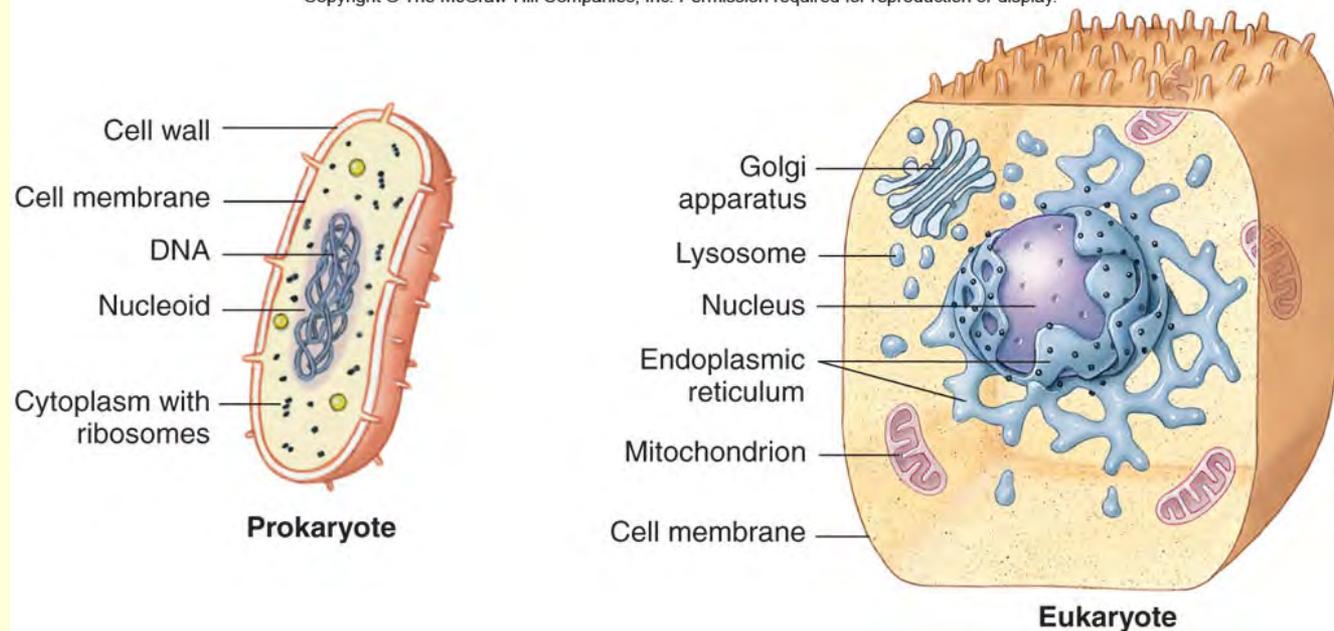
[Le] développement des cyanobactéries photosynthétiques [est] à l'origine de [...] l'**oxygène dans l'atmosphère terrestre.**

**Vers -2,1 milliards d'années** [la concentration en oxygène de l'air atteint] un seuil de 4 % qui voit l'émergence de la vie **multicellulaire aérobie.**





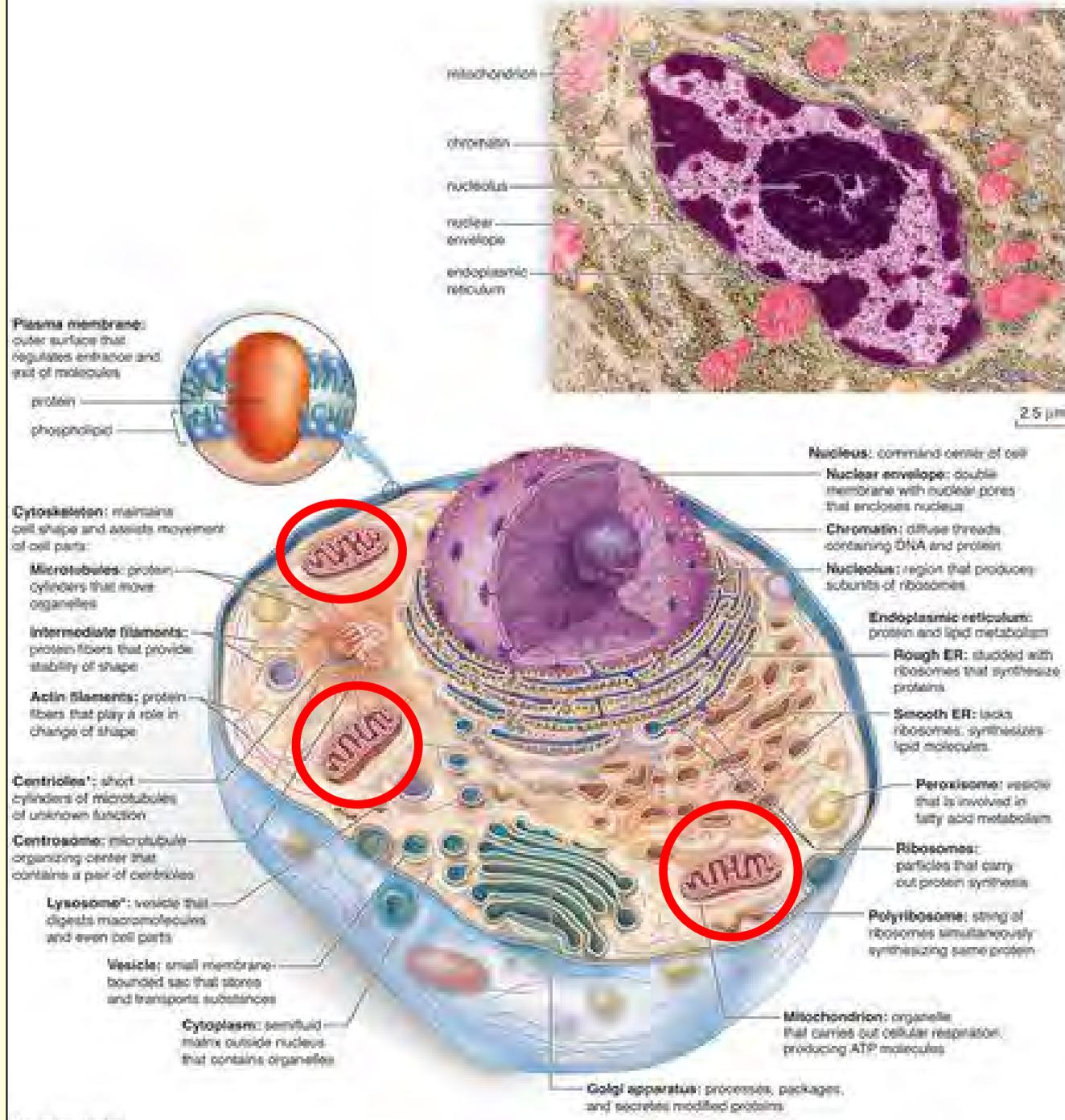
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



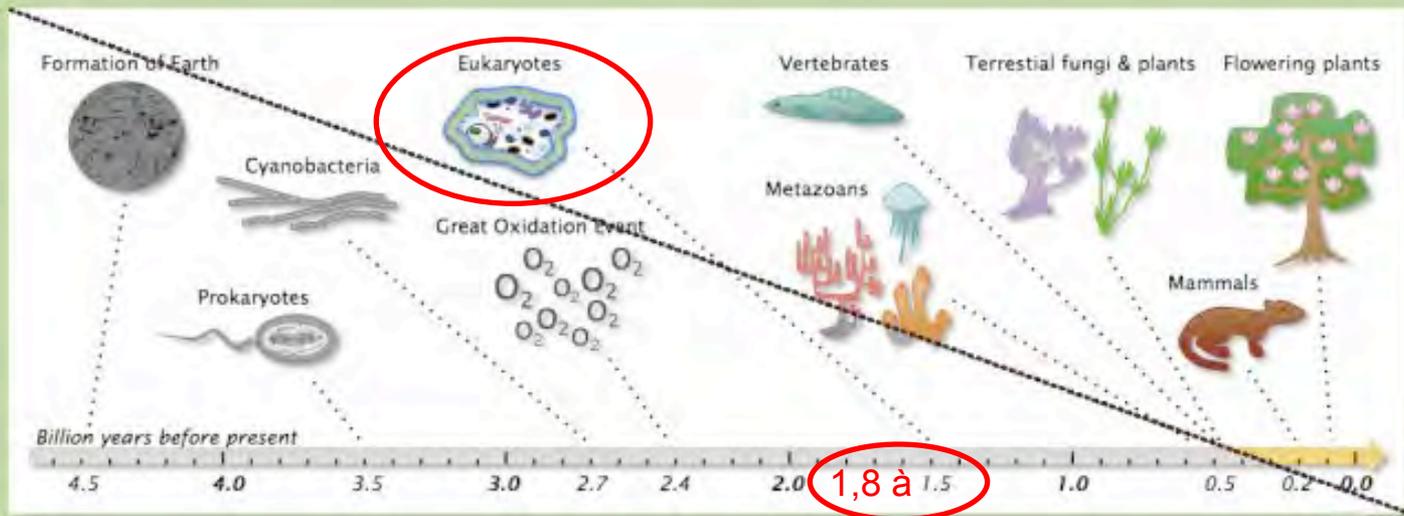
Les réseaux complexes se « compartimentalisent »

Dans le **noyau**, où se retrouve l'ADN.

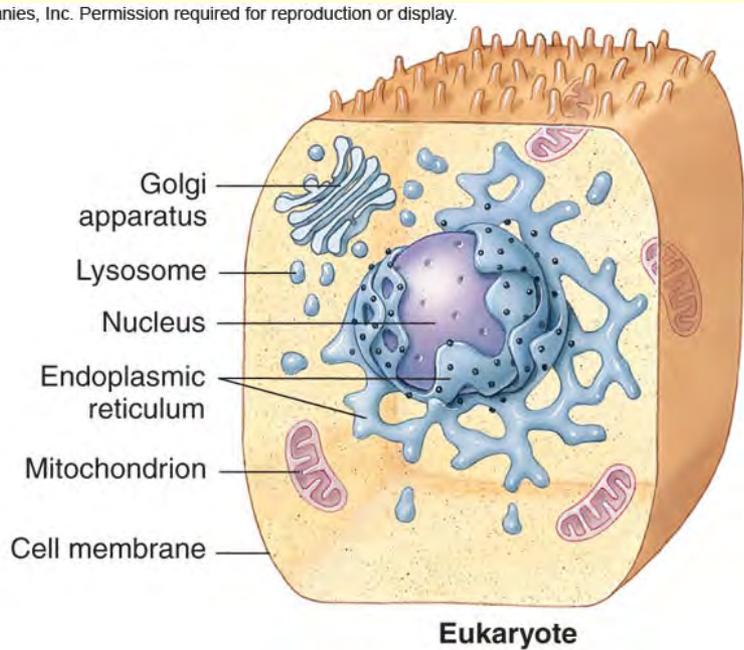
Mais aussi dans différents compartiments, dont un très important, les **mitochondries**.

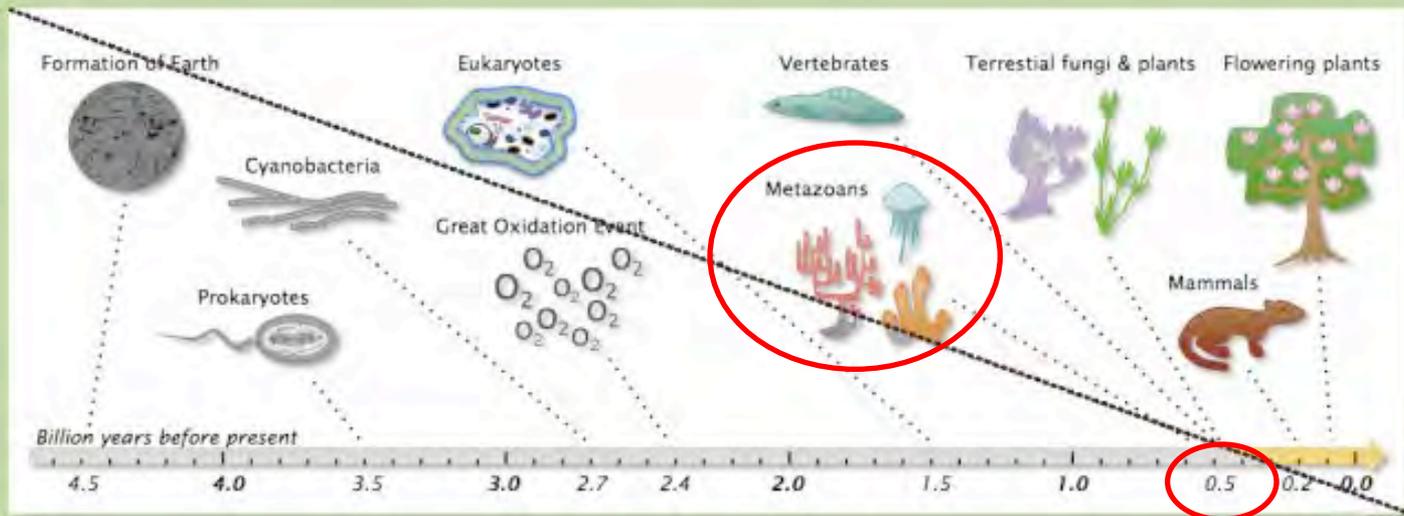


Note: In plant cells

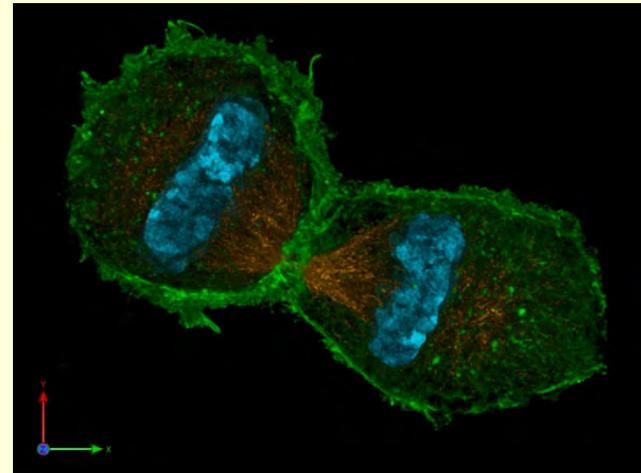
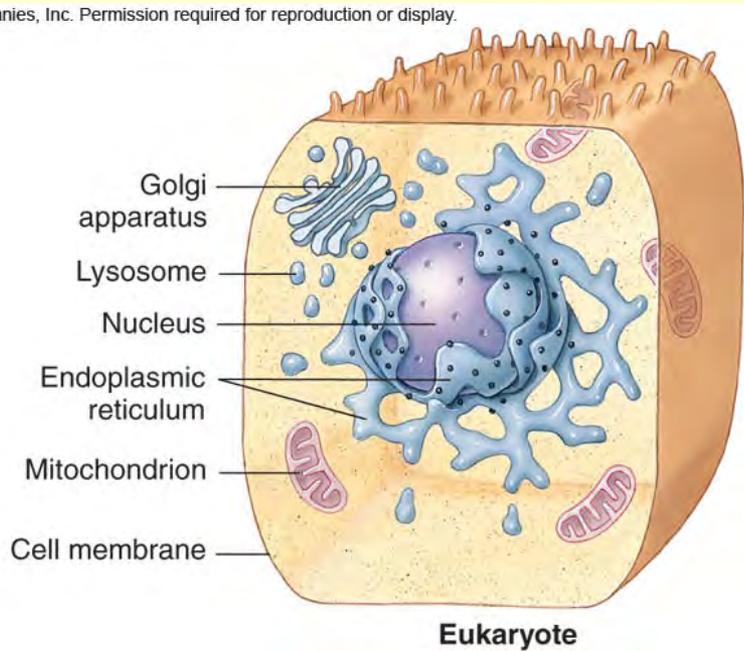


© 2008 McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

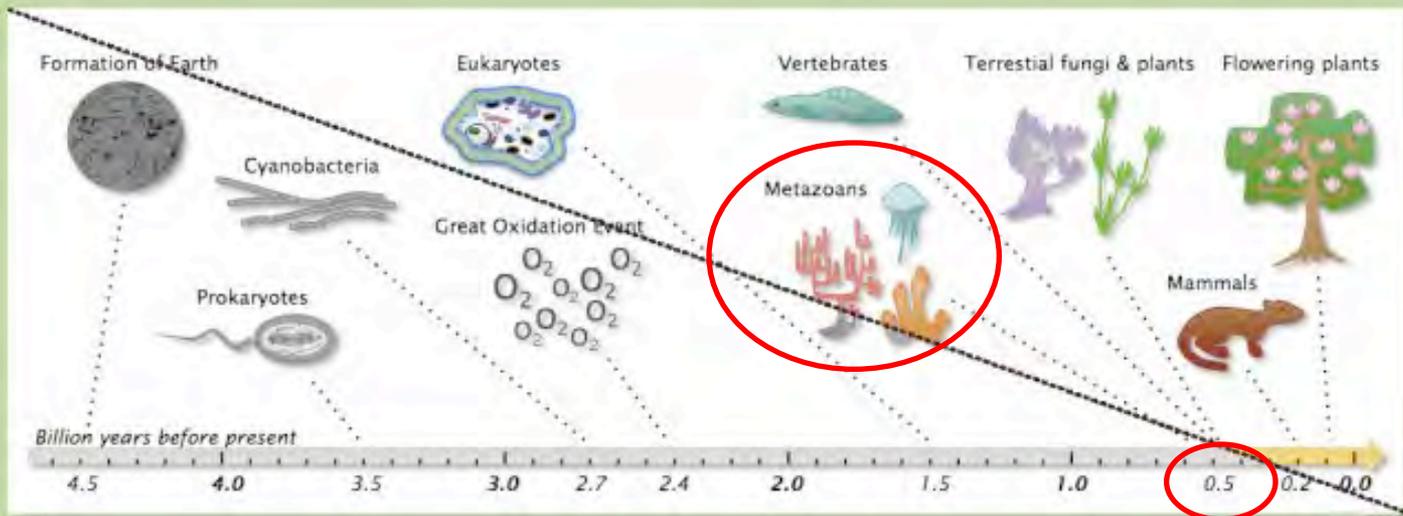




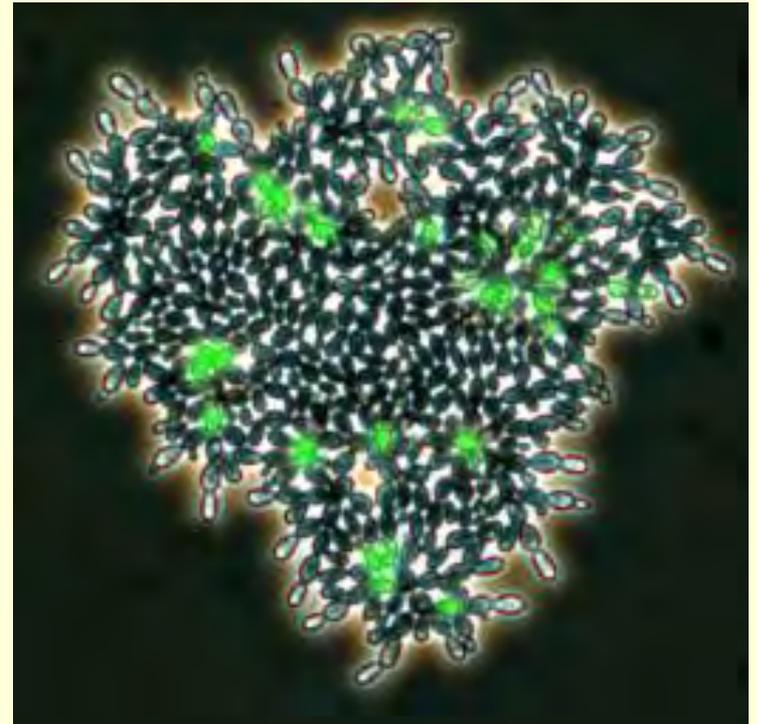
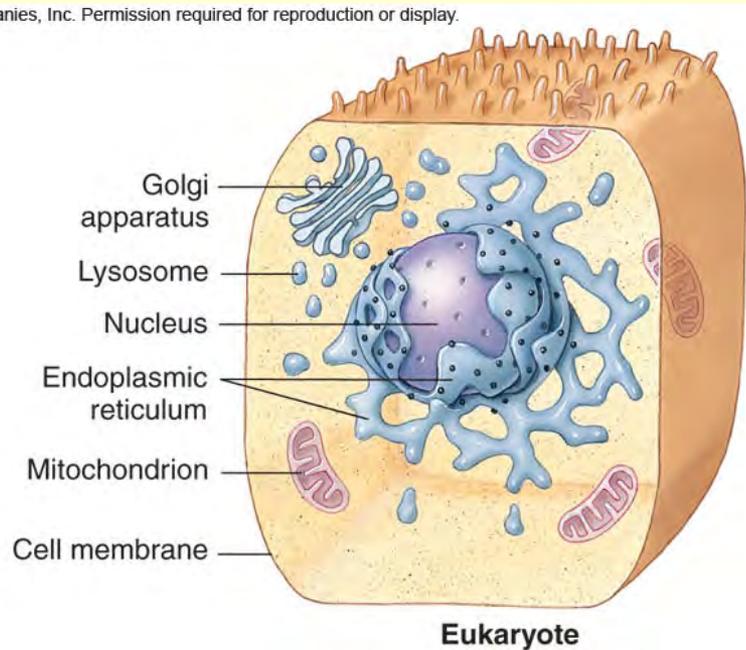
Copyright © 2008 McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

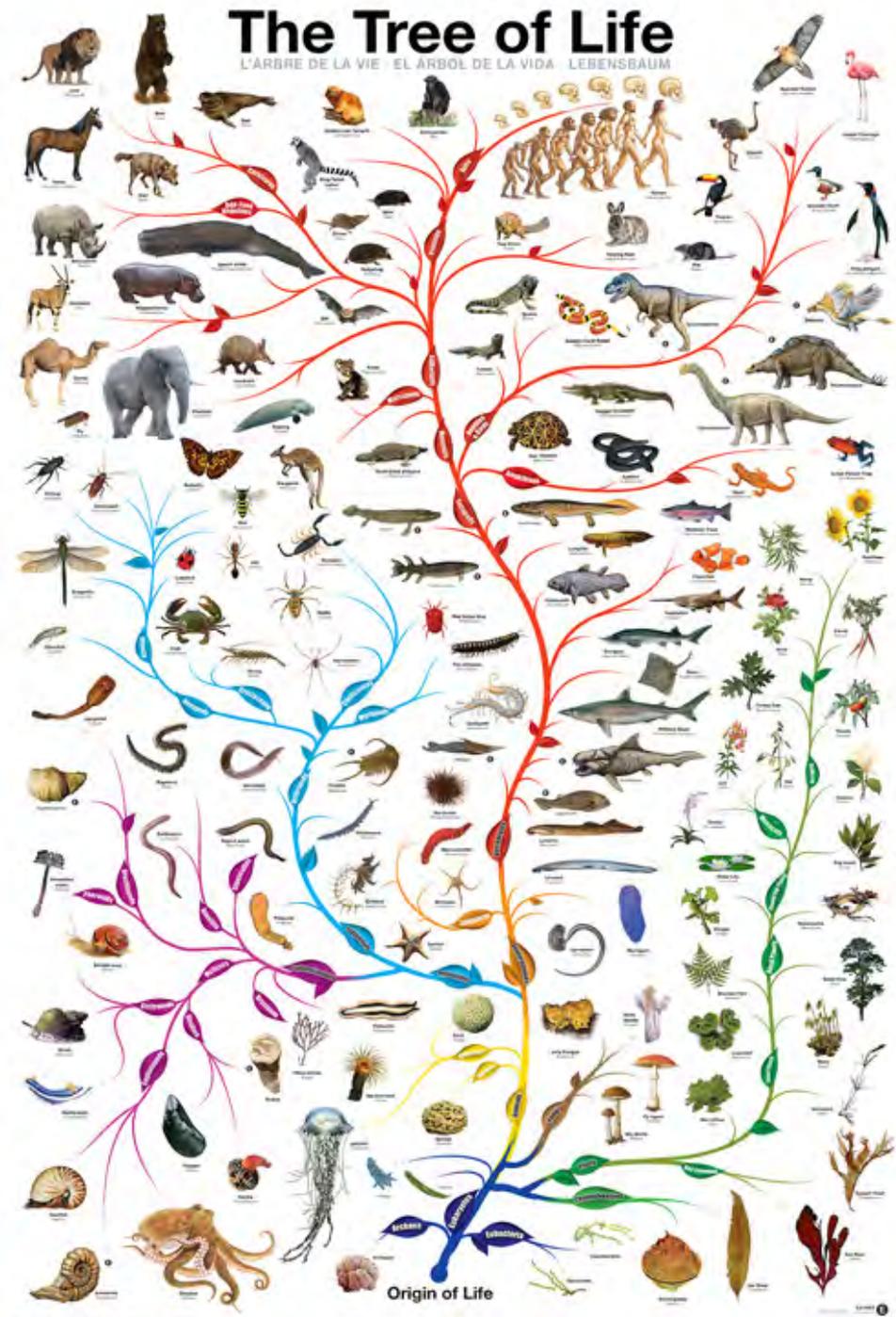
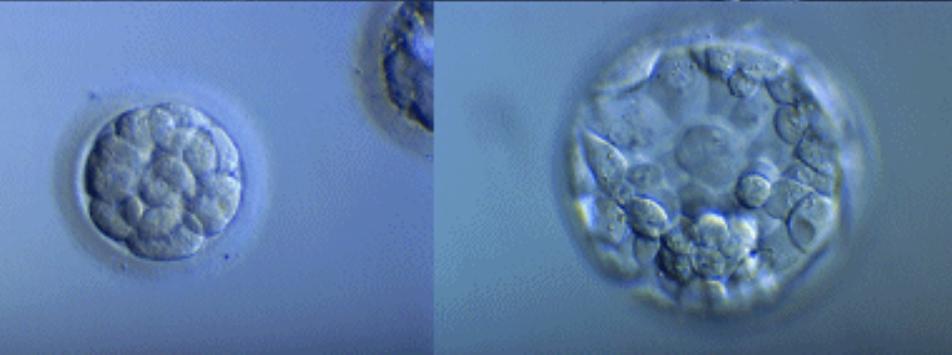
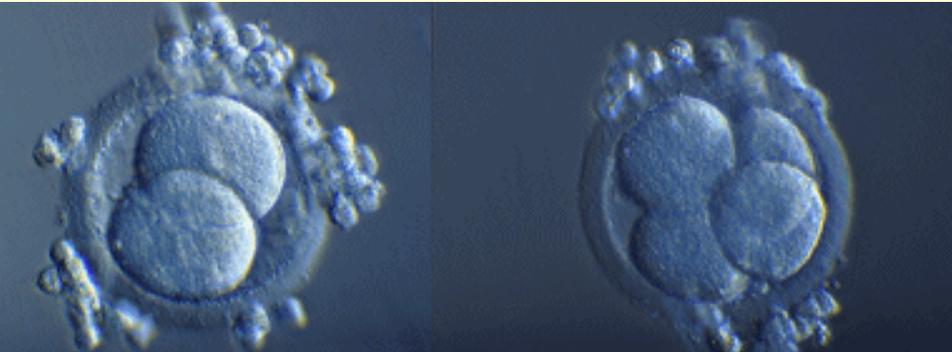
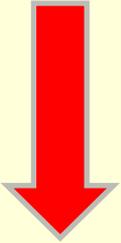
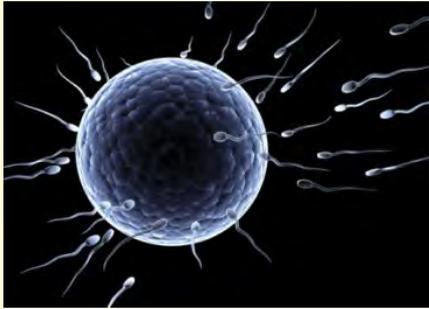


La multicellularité est apparue au moins 25 fois au cours de l'évolution.

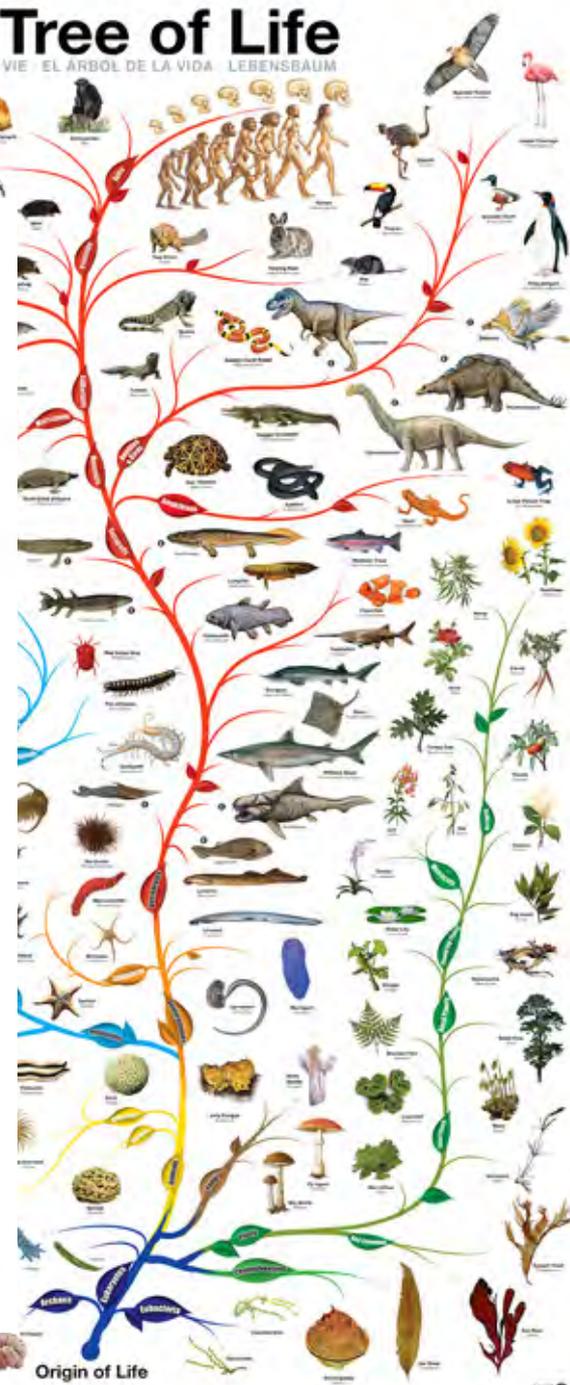
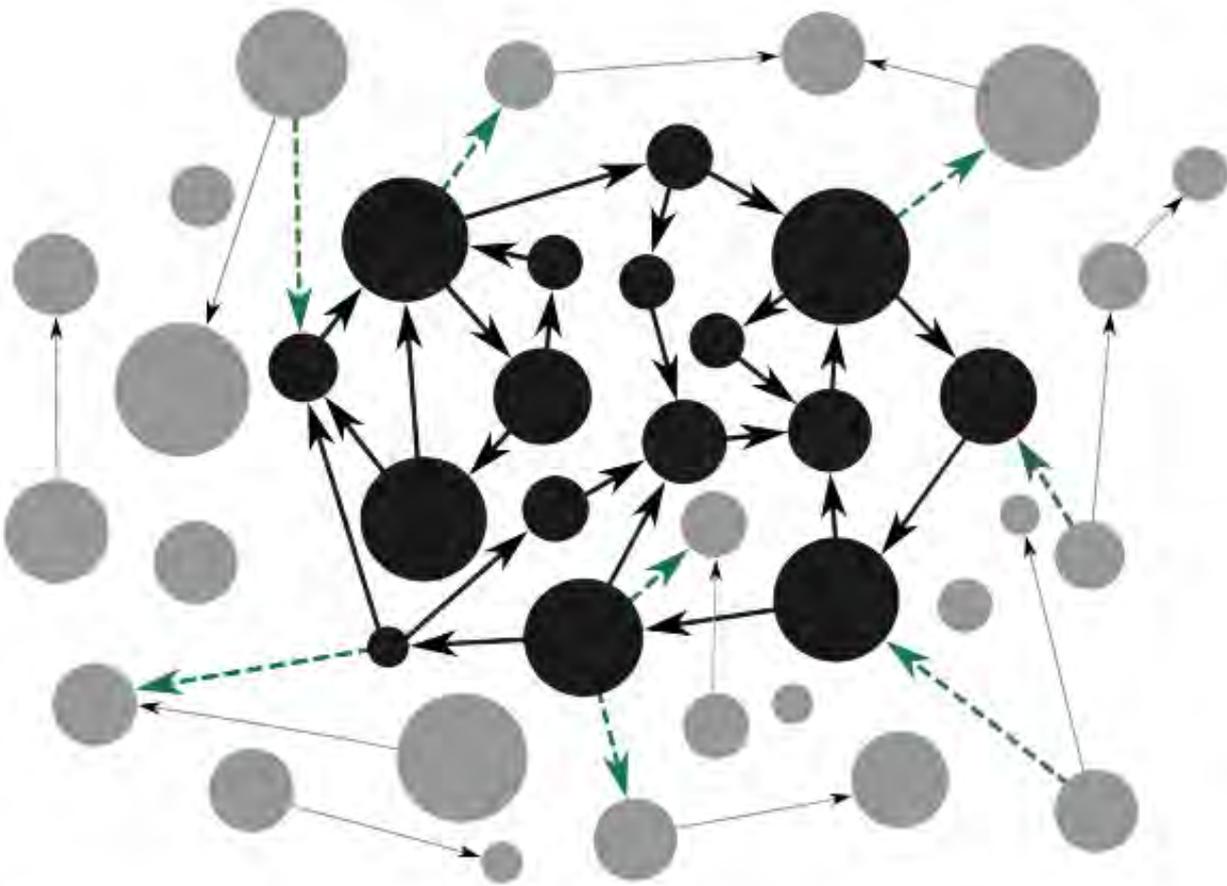


© 2004 McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





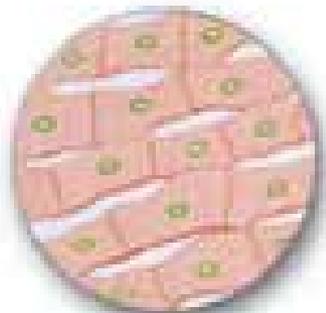
En noir : une cellule un organisme



Chez les multicellulaires, on va aussi assister au phénomène de **spécialisation cellulaire**...



**cellule  
pancréatique**



**cellule  
cardiaque**



**cellule  
sanguine**



**cellule  
pulmonaire**



**ovule**



**cellule  
osseuse**



**cellule  
de la rate**



**cellule  
musculaire**



**cellule  
du cerveau**

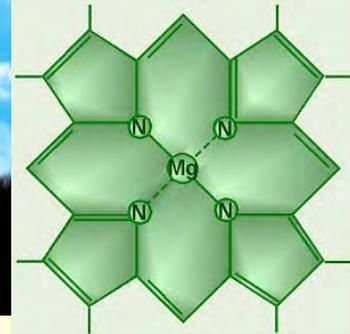
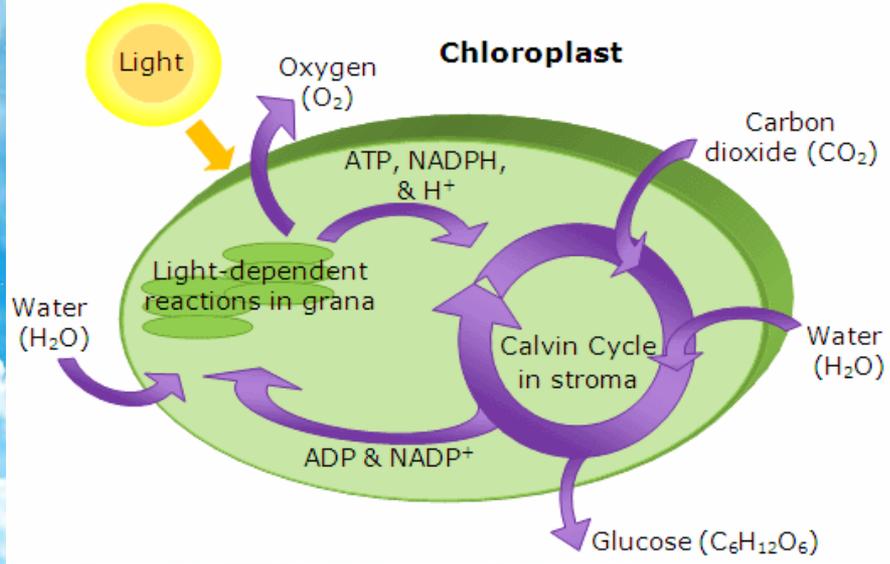
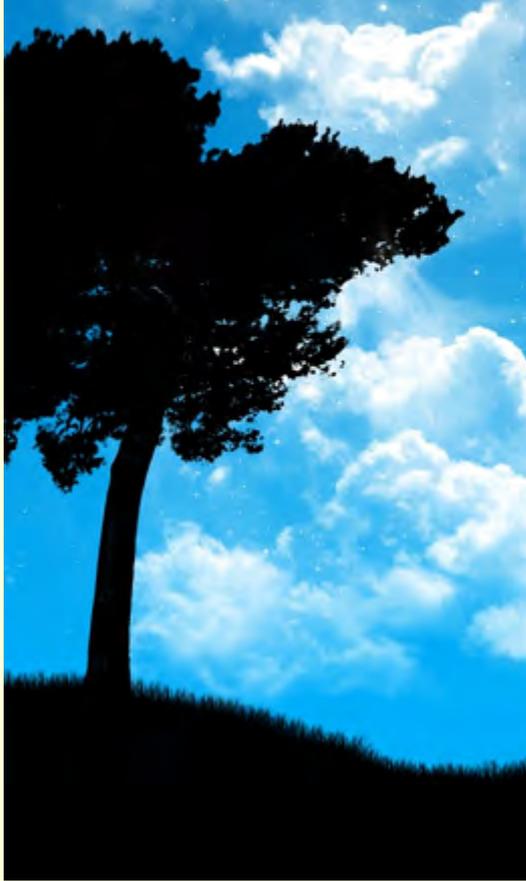


**cellule  
du foie**



« La seule raison d'être d'un être vivant, c'est **d'être**,  
c'est-à-dire de **maintenir sa structure.** »

- Henri Laborit

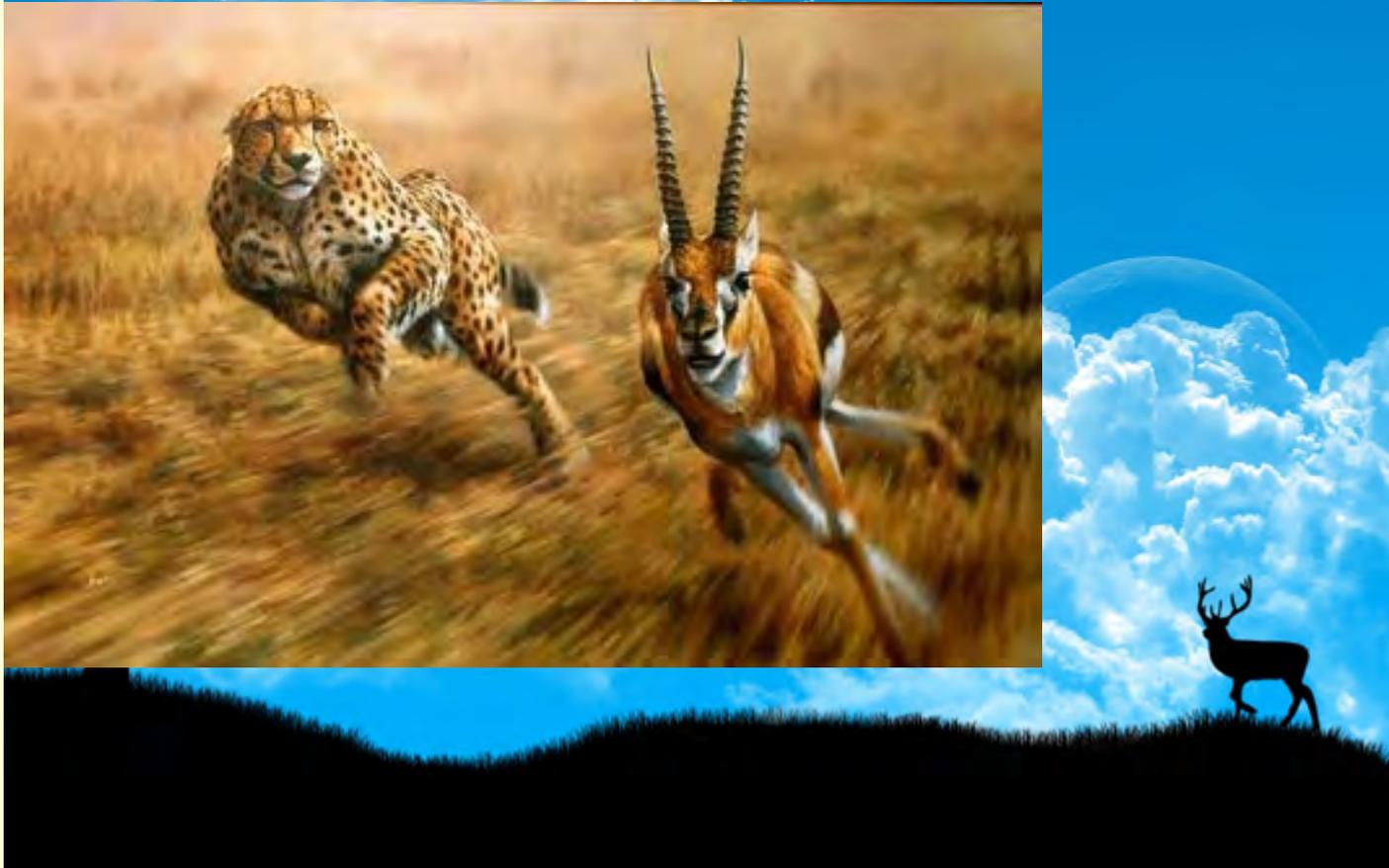


Plantes :

photosynthèse

grâce à l'énergie du soleil

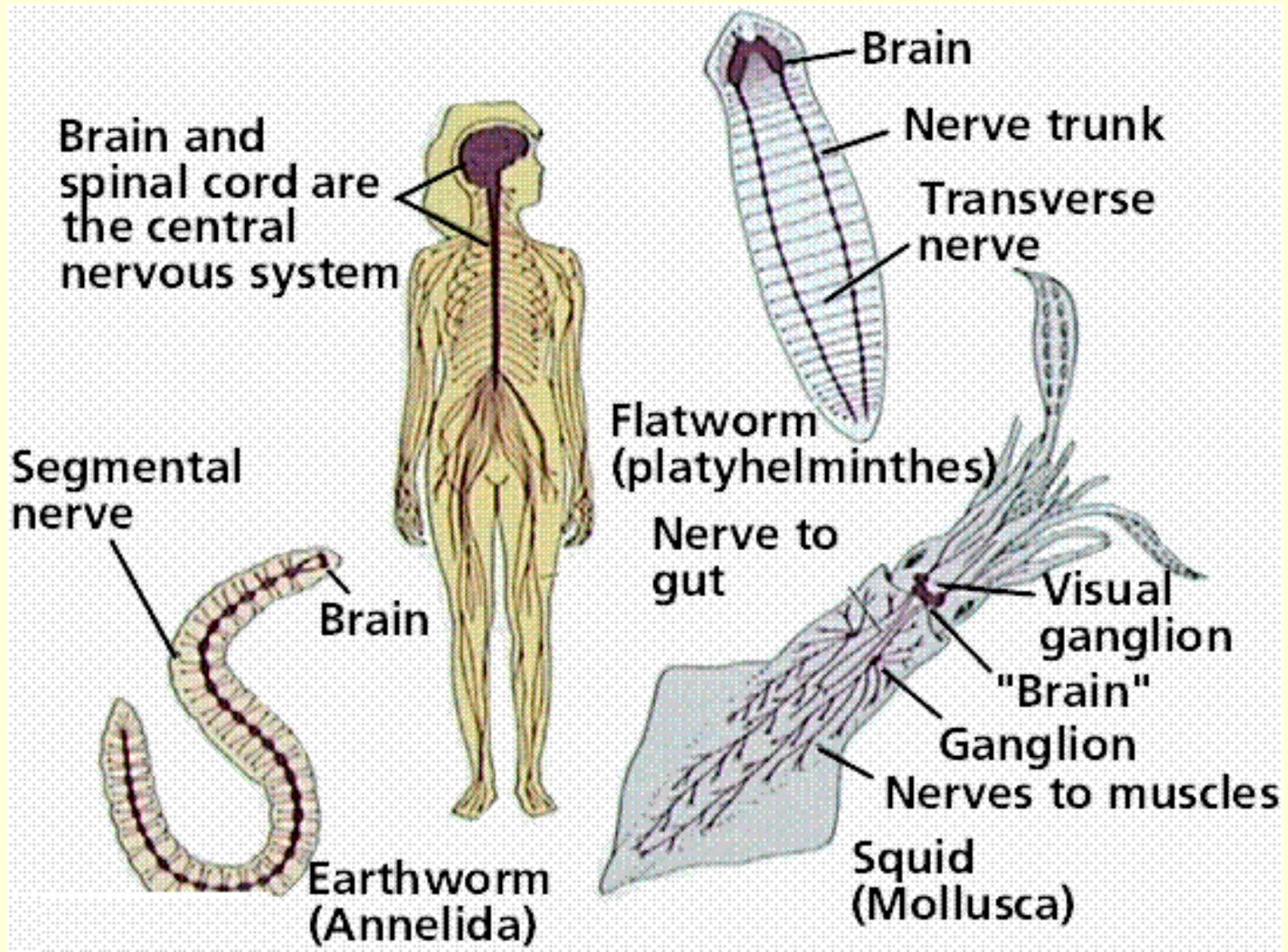




## Animaux :

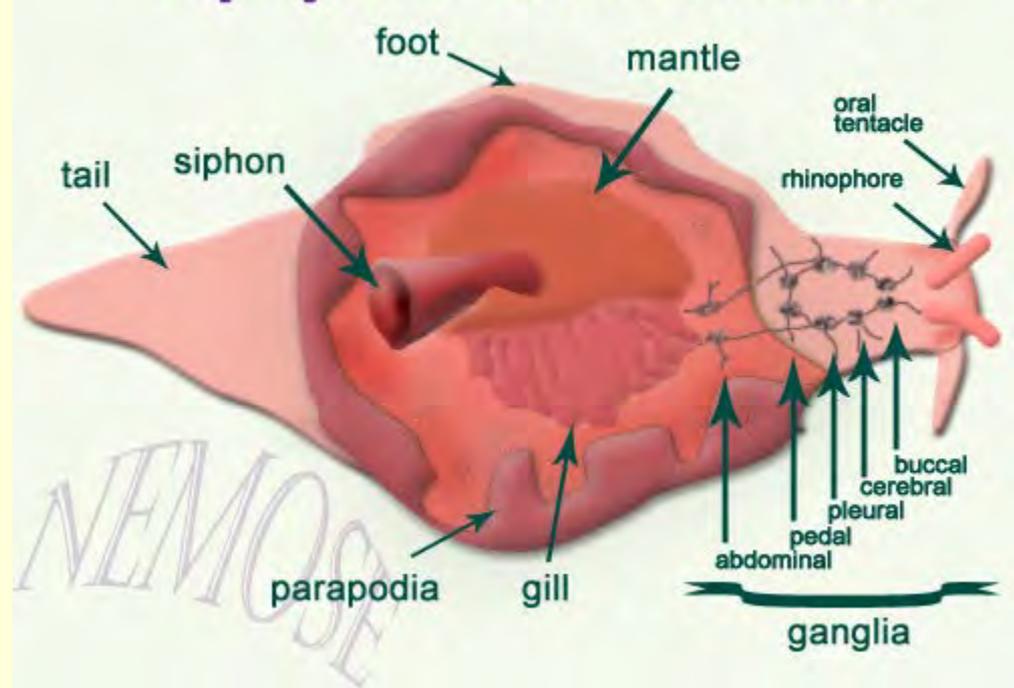
**autonomie motrice**  
pour trouver leurs ressources  
dans l'environnement

# Systemes nerveux !

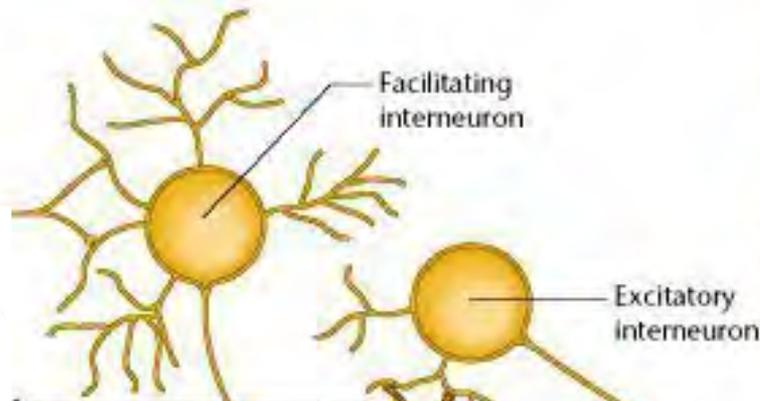
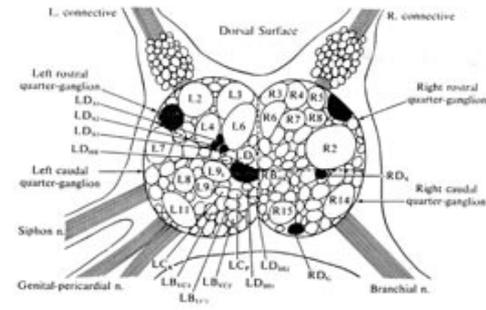




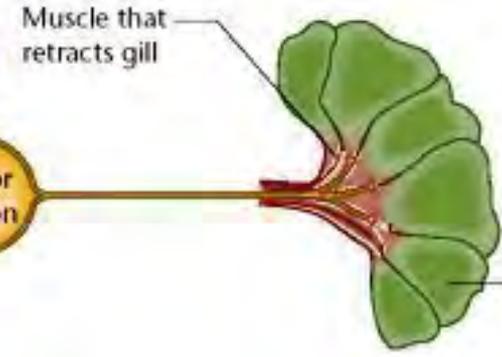
**Aplysie**  
(mollusque marin)







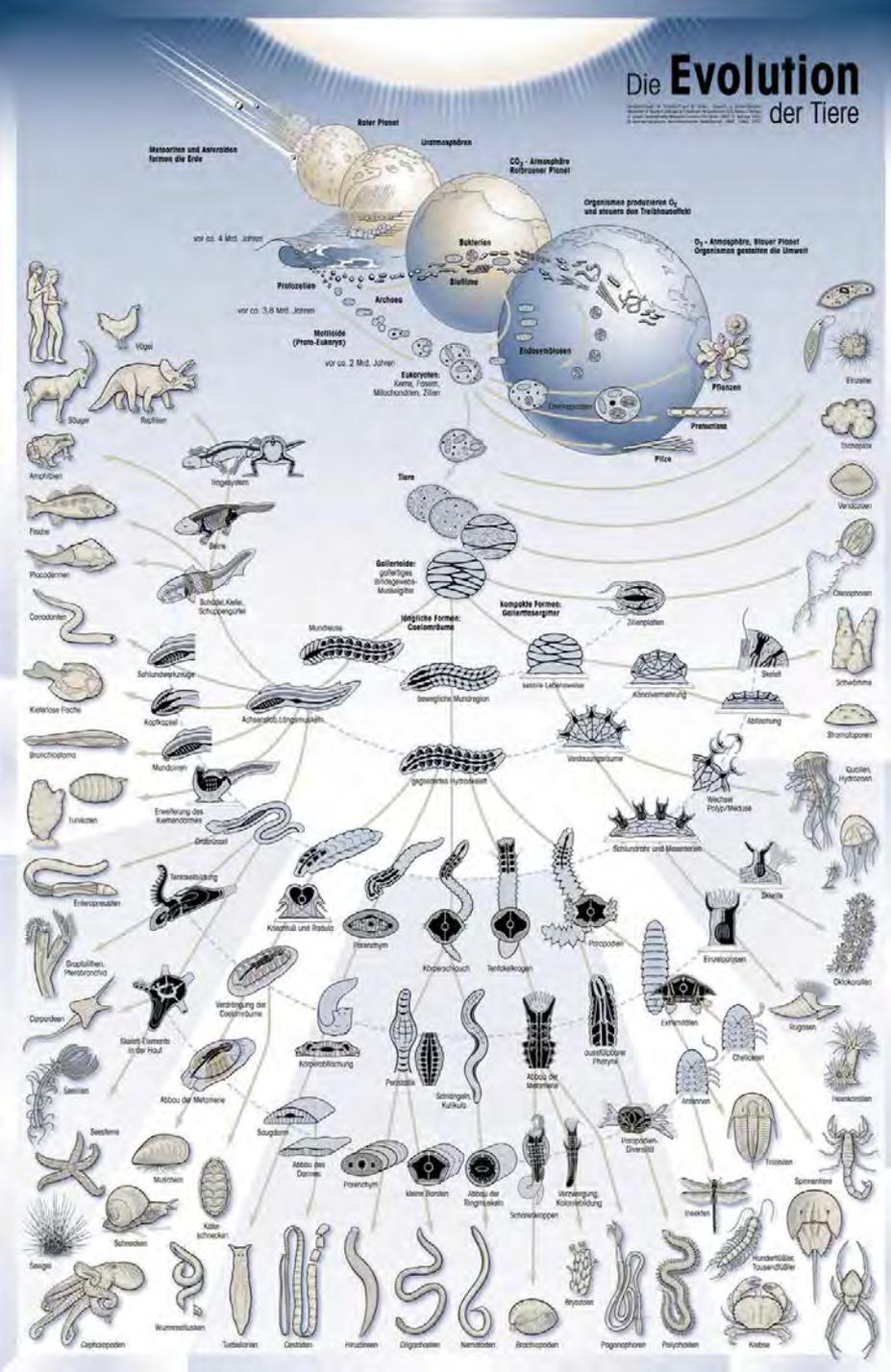
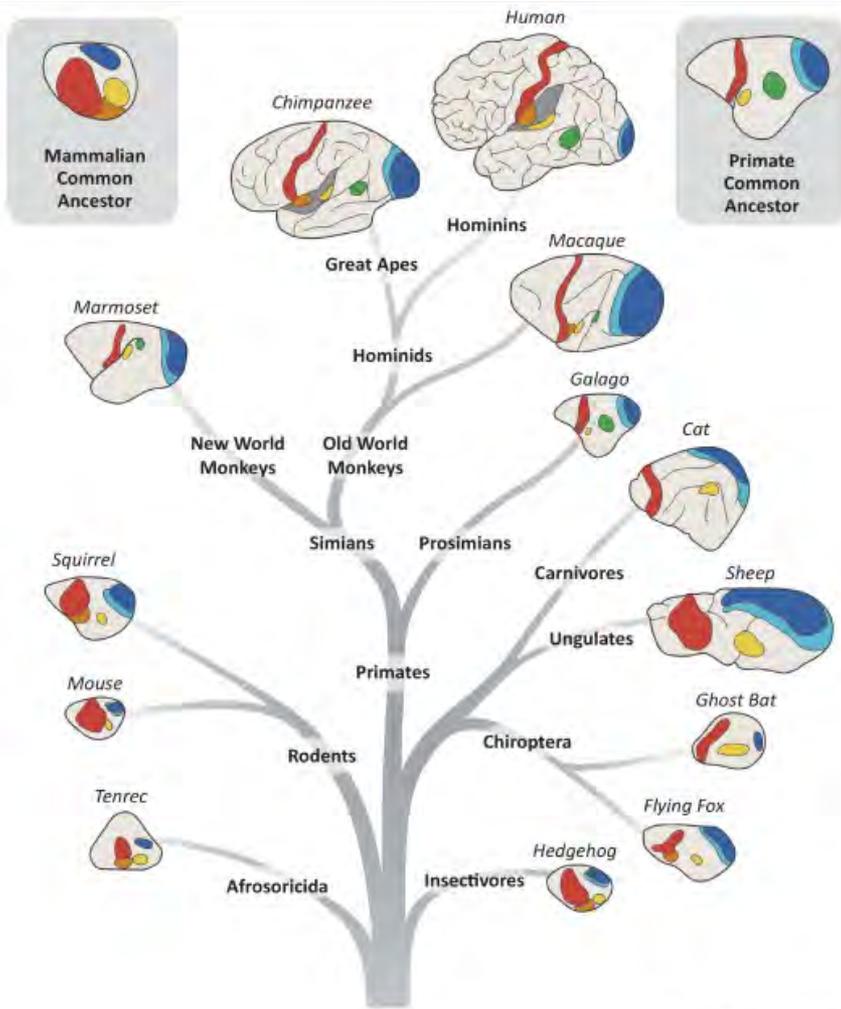
Synapses, neurotransmitter



Une boucle sensori - motrice



Pendant des centaines de millions d'années, c'est cette boucle-sensorimotrice qui va se complexifier...

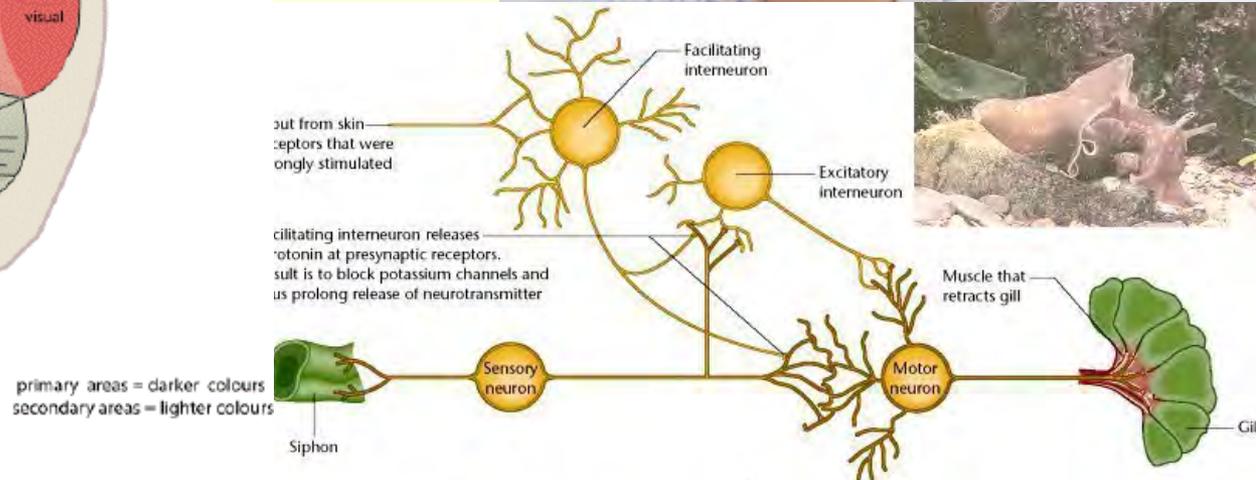
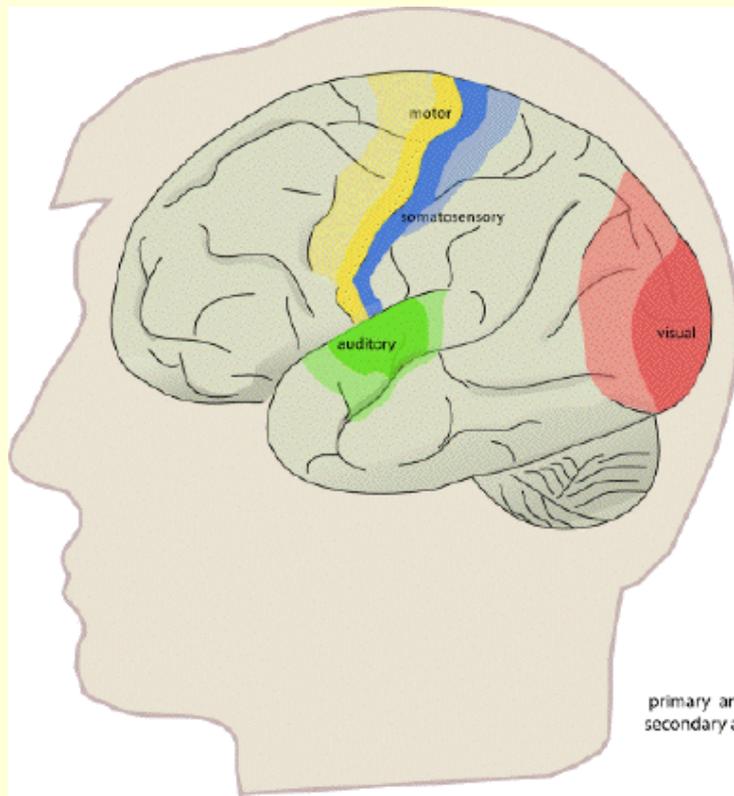




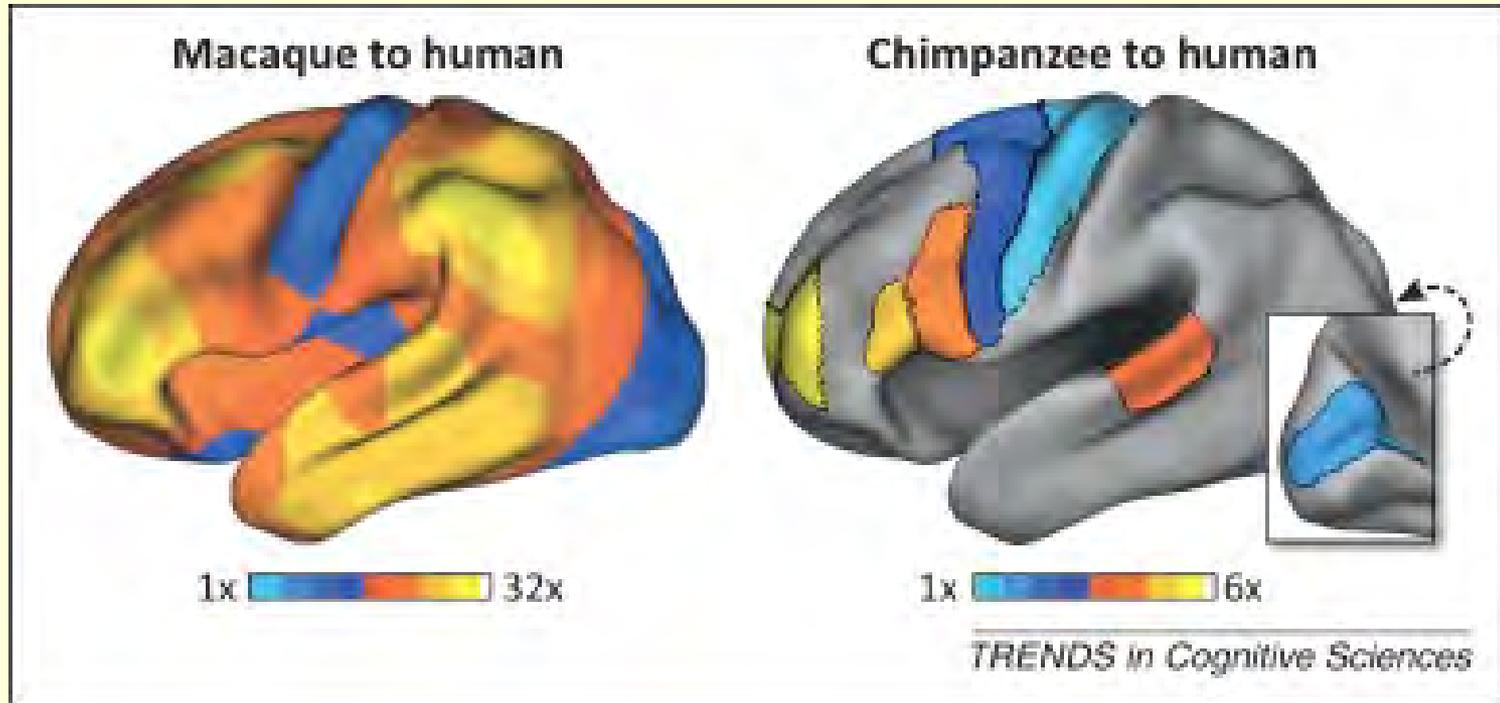
Le cerveau humain est encore construit sur cette **boucle perception – action**,

mais la plus grande partie du cortex humain va essentiellement **moduler cette boucle**,

comme les inter-neurones de l'aplysie.



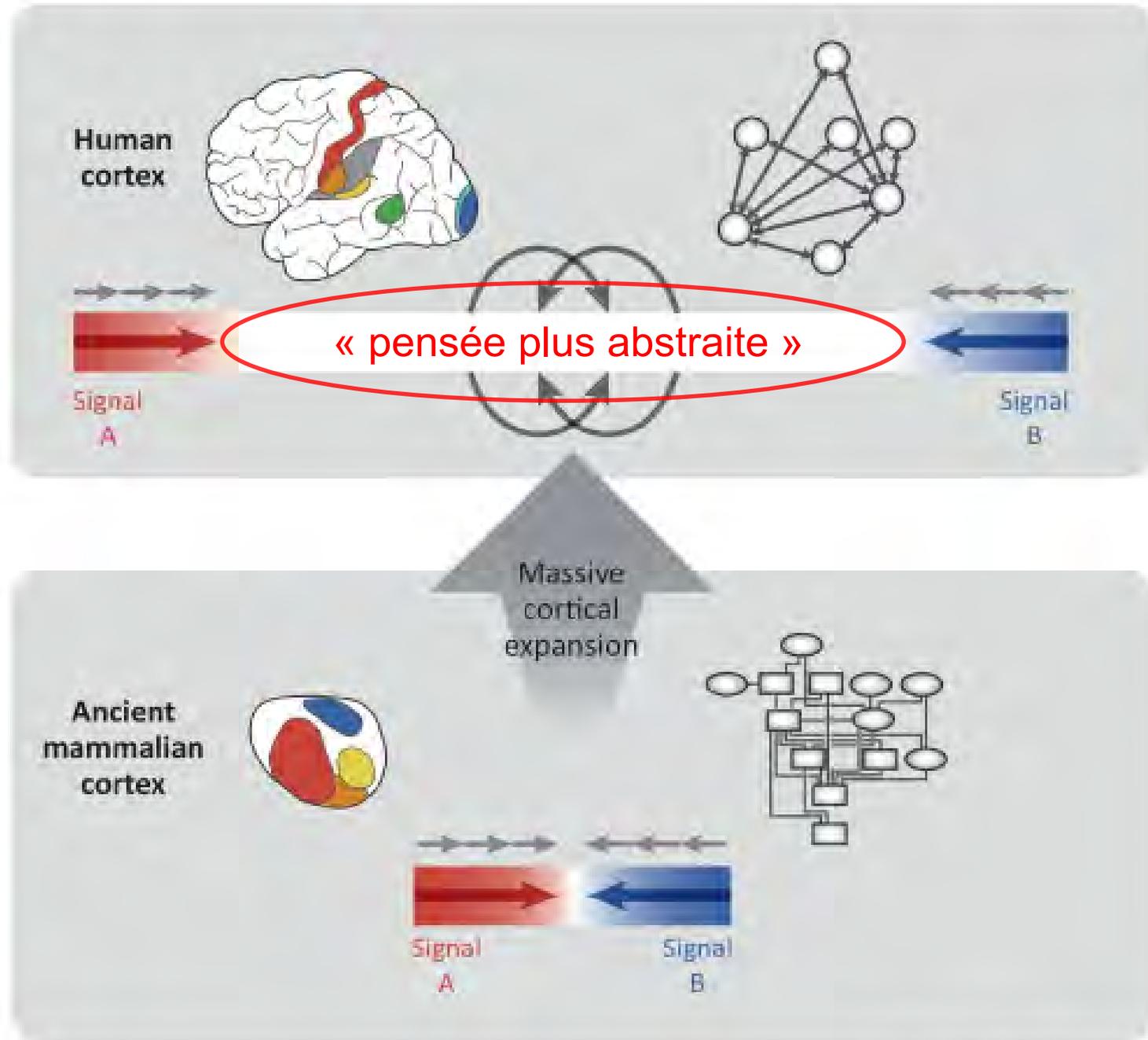
Si l'on revient à la transition des primates à l'humain, on constate que c'est là que le **néocortex s'est le plus développé**.



Les couleurs représentent ici la valeur de l'augmentation de surface nécessaire pour que chaque région soit transposée du cerveau de **macaque** et du cerveau de **chimpanzé** au **cerveau humain**.

(dont notre ancêtre commun avec le premier auraient vécu il y a environ 25 millions d'années et 5-7 millions d'années pour le second).

L'expansion rapide du cortex chez l'humain a fait émerger de large portions de **cortex dit « associatif »** plus ou moins détachées des cortex sensoriels.

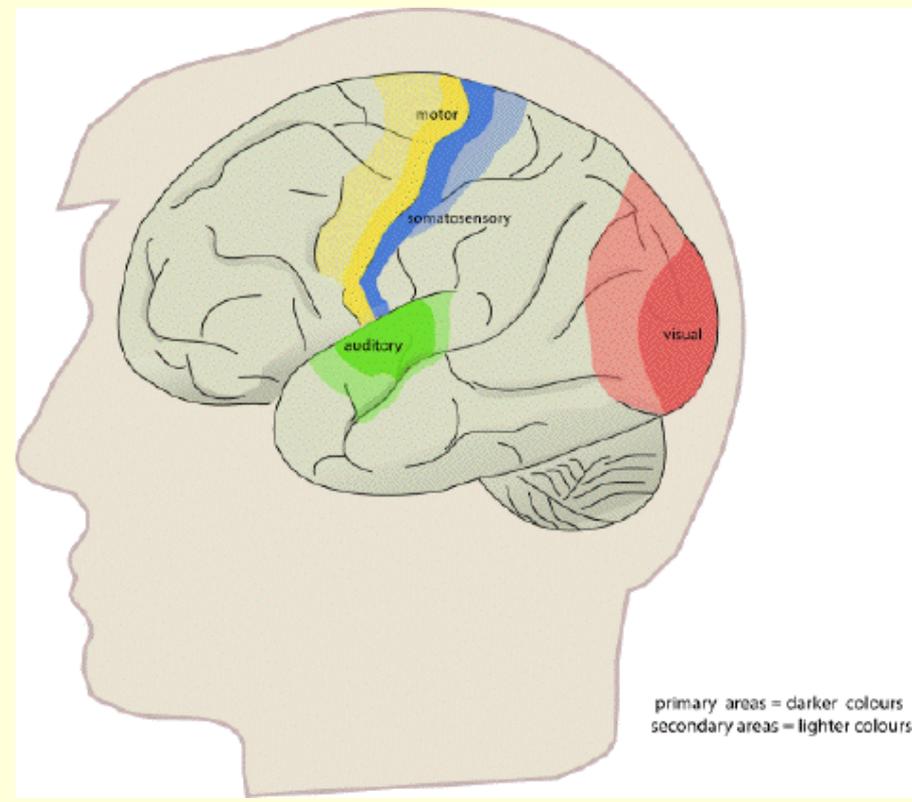
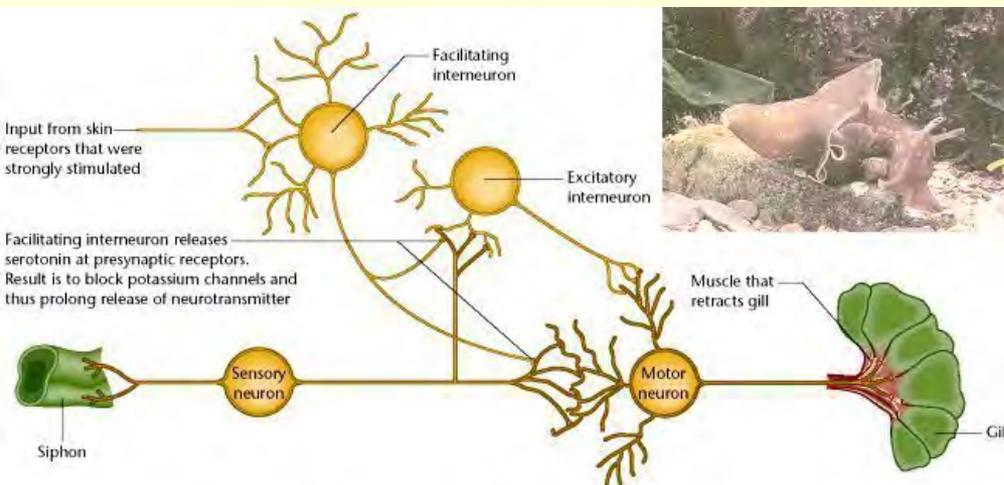


**En guise de conclusion** (très partielle...) :

Il semble y avoir une autre constante remarquable durant l'évolution, du simple réflexe sensori-moteur jusqu'à la conscience humaine.

Car on peut revenir au tout début de la vie et se demander quel serait « l'événement premier » à partir duquel se construirait toute « **sentience** » subséquente dans la psychologie animale...

(le signal que quelque chose peut nous concerner dans l'environnement)

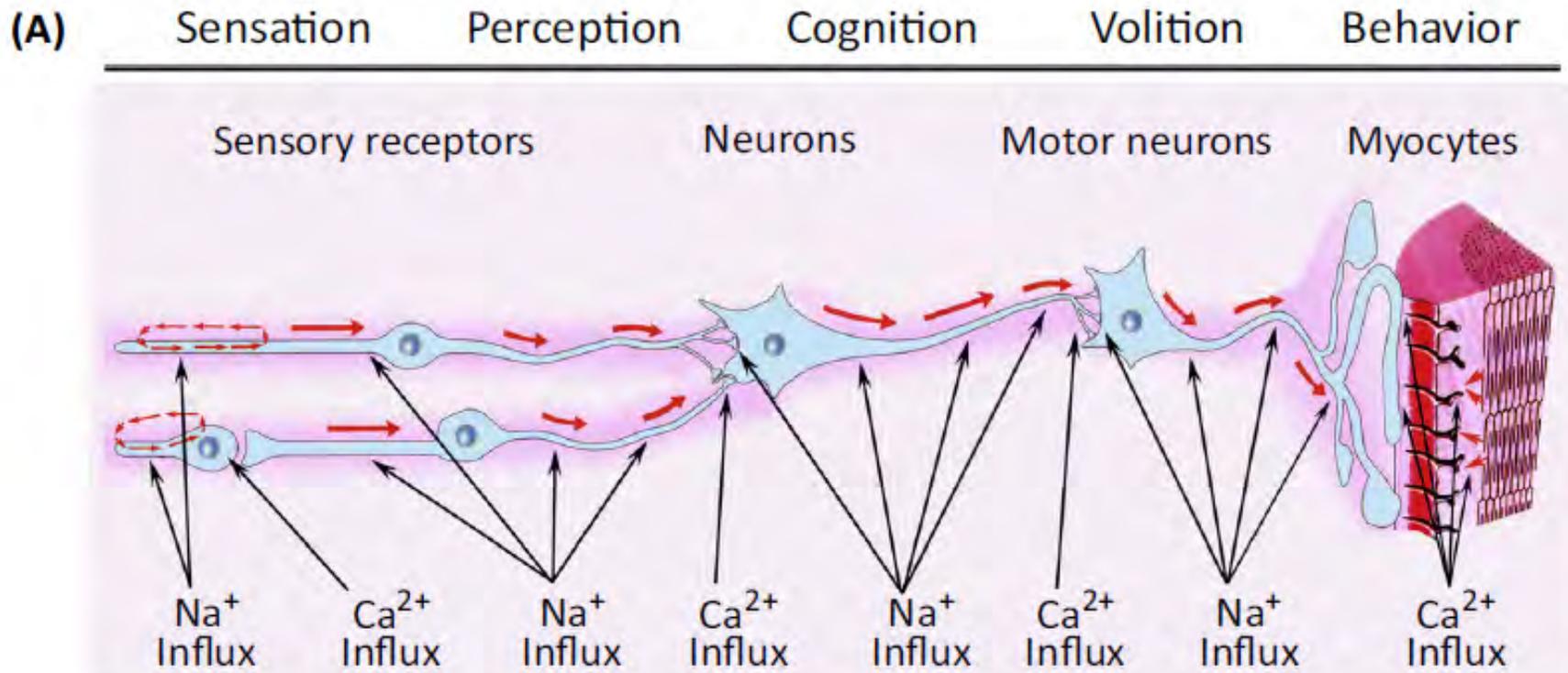


Cette perturbation environnementale première qui alerte en quelque sorte la cellule qu'il se passe « quelque chose » qui la concerne dans l'environnement serait, selon N.D. Cook, G.B. Carvalho et A. Damasio, les **ions positifs**, essentiellement de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) qui entrent massivement dans la cellule...

## From membrane excitability to metazoan psychology

<http://www.cell.com/trends/neurosciences/abstract/S0166-2236%2814%2900128-3?cc=y>

Trends in Neuroscience, **December 2014**



# 1<sup>ÈRE</sup> HEURE : Notre histoire

**Survol des sciences cognitives depuis un siècle**

**Big History et évolution biologique**

**Neurobio 101**

- Où l'on va rappeler les bases de la communication et de la plasticité neuronale pour mieux comprendre la suite...

Université du troisième âge des Laurentides et de Boucherville (21 janvier - 15 mars 2016)

**Cours 2: A- Modèles scientifiques et théorie du neurone;**  
**B- Mise à jour de la théorie du neurone**

[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop\\_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%202%20-%20Th%E9orie%20du%20neurone%20-%20aut%202015%20-%20v%20finale%20-%20pour%20pdf.pdf](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%202%20-%20Th%E9orie%20du%20neurone%20-%20aut%202015%20-%20v%20finale%20-%20pour%20pdf.pdf)





neurones univers mécanique quanti  
Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur...  
**Les trois infinis :**  
**le petit, le grand et le complexe**

l'UPop Montréal vous propose une activité spéciale sur le Mont-Royal

La complexité à pied : quand le Mont-Royal devient notre cerveau !

Départ : samedi 16 mai, 14h., statue des tam-tams

Tous les détails au [www.upopmontreal.com](http://www.upopmontreal.com)



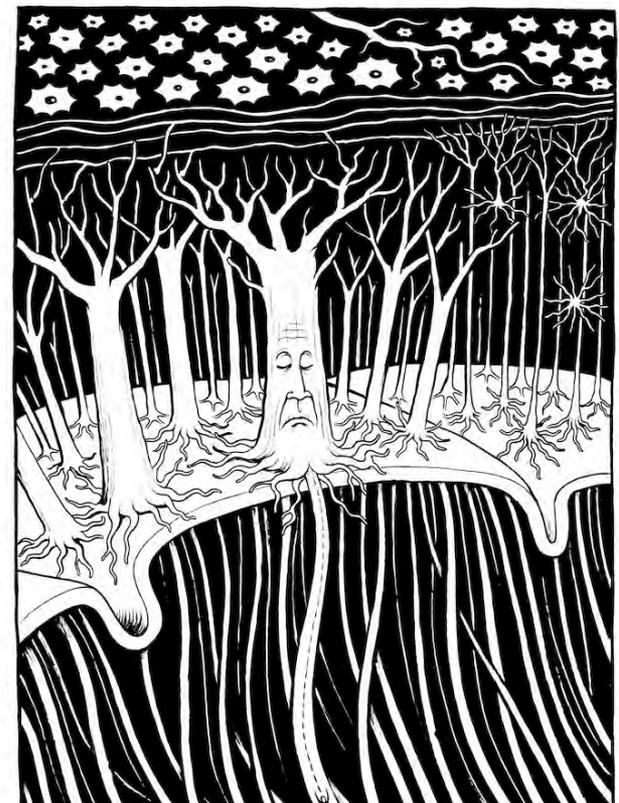
neurones univers mécanique quanti  
Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur...  
**Les trois infinis :**  
**le petit, le grand et le complexe**

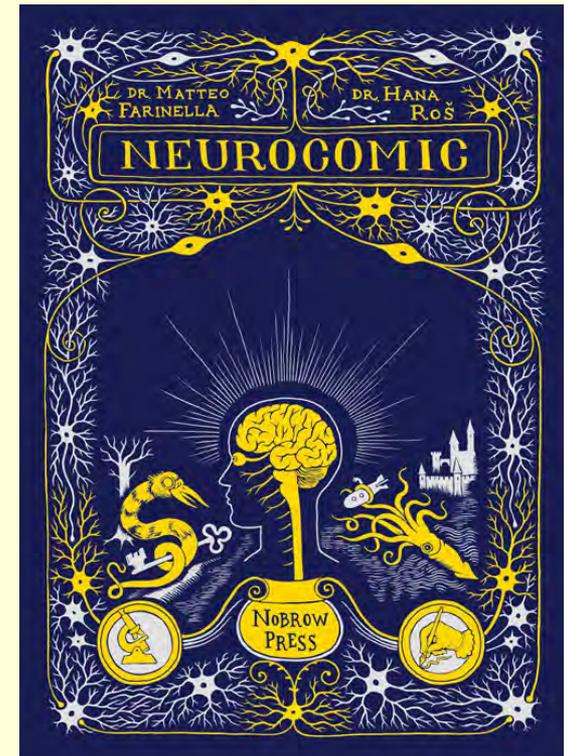
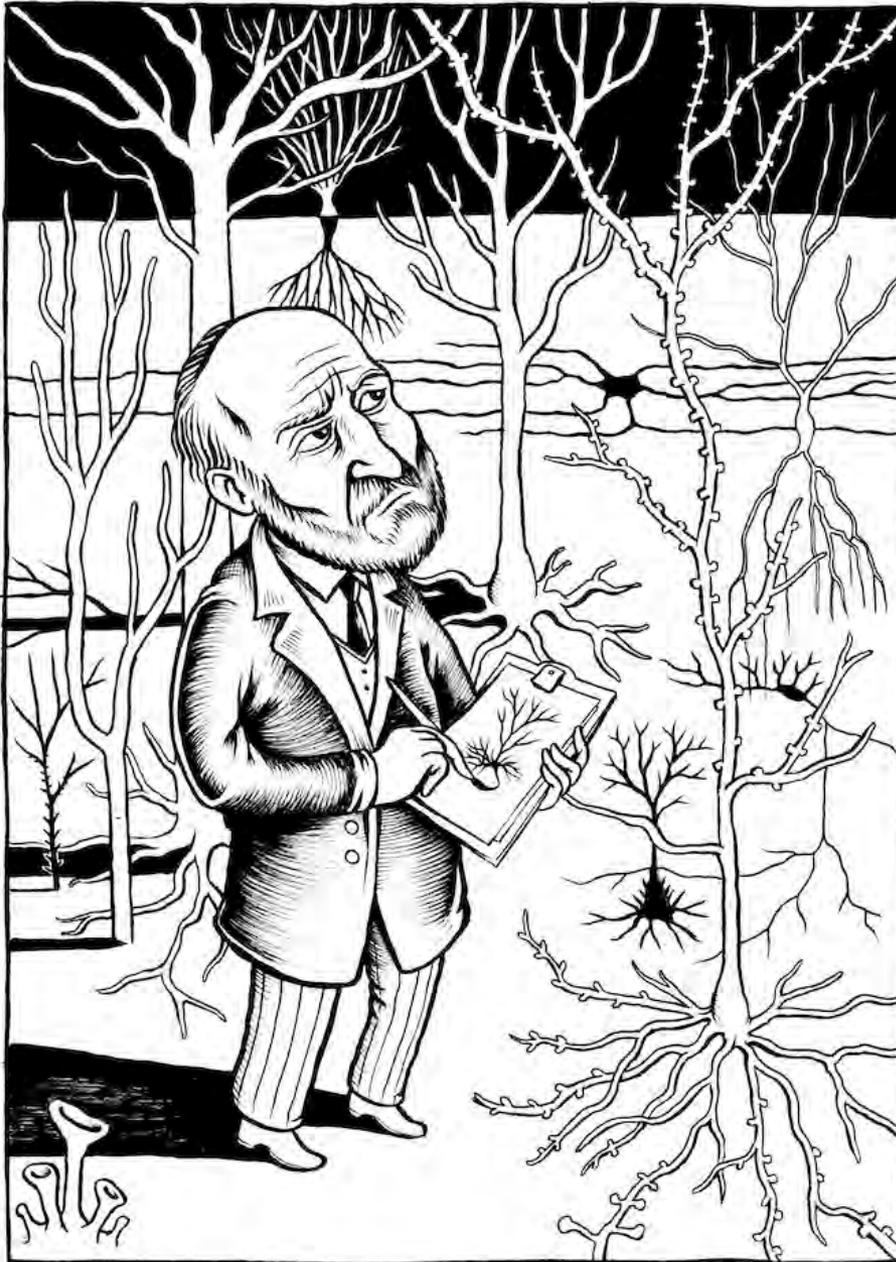
l'UPop Montréal vous propose une activité spéciale sur le Mont-Royal

La complexité à pied : quand le Mont-Royal devient notre cerveau !

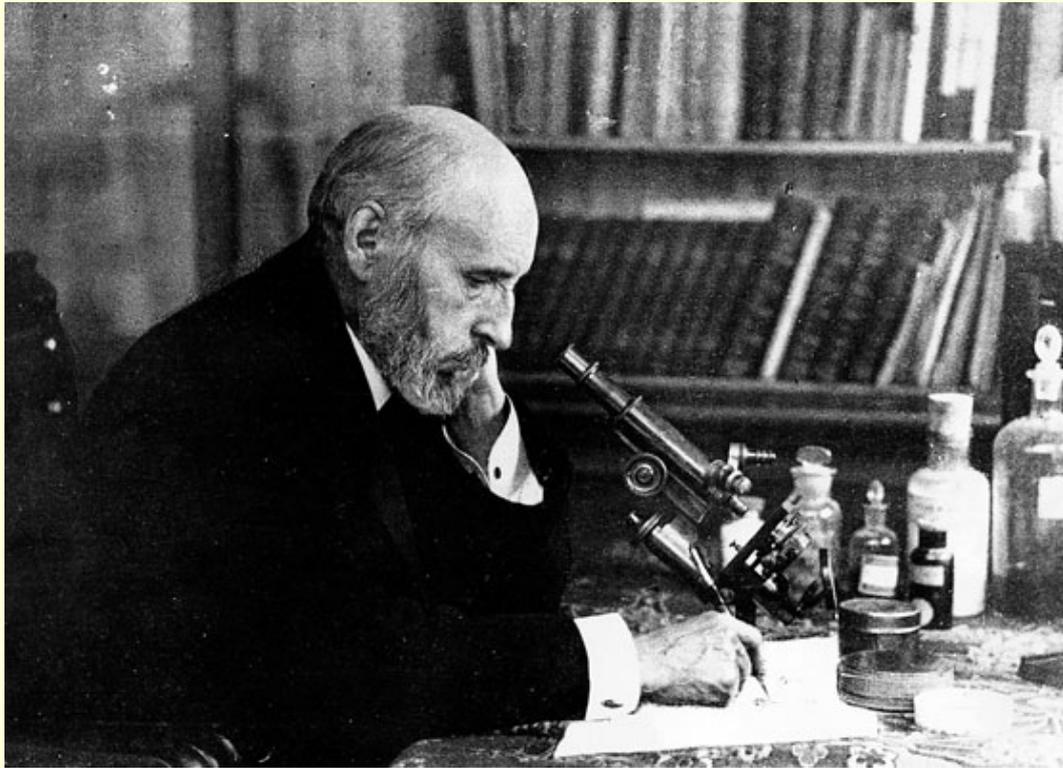
Départ : samedi 16 mai, 14h., statue des tam-tams

Tous les détails au [www.upopmontreal.com](http://www.upopmontreal.com)

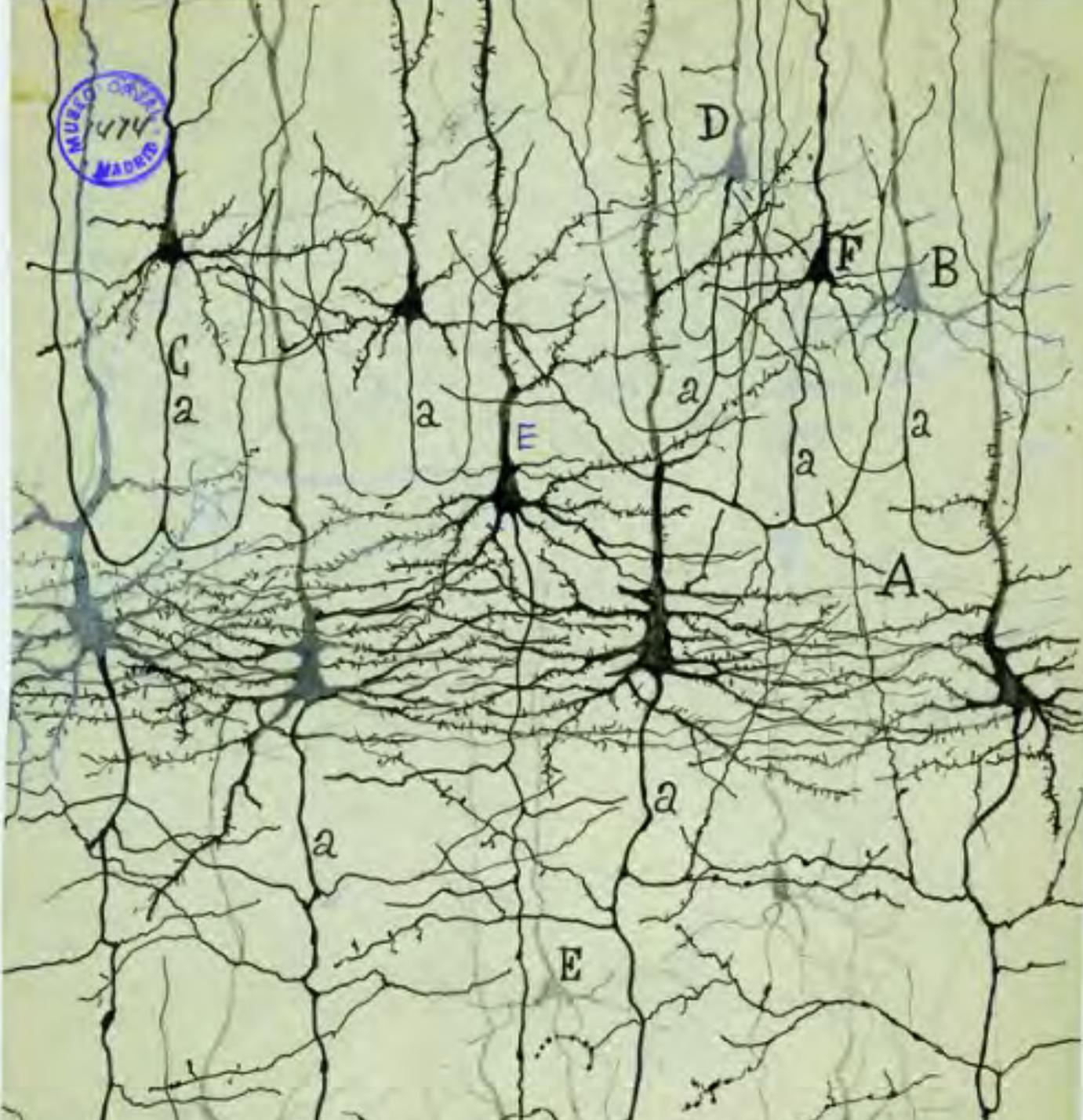




[http://www.brainpickings.org/index.php/2014/04/02/neurocomic-nobrow/?utm\\_content=buffer78bdd&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](http://www.brainpickings.org/index.php/2014/04/02/neurocomic-nobrow/?utm_content=buffer78bdd&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer)



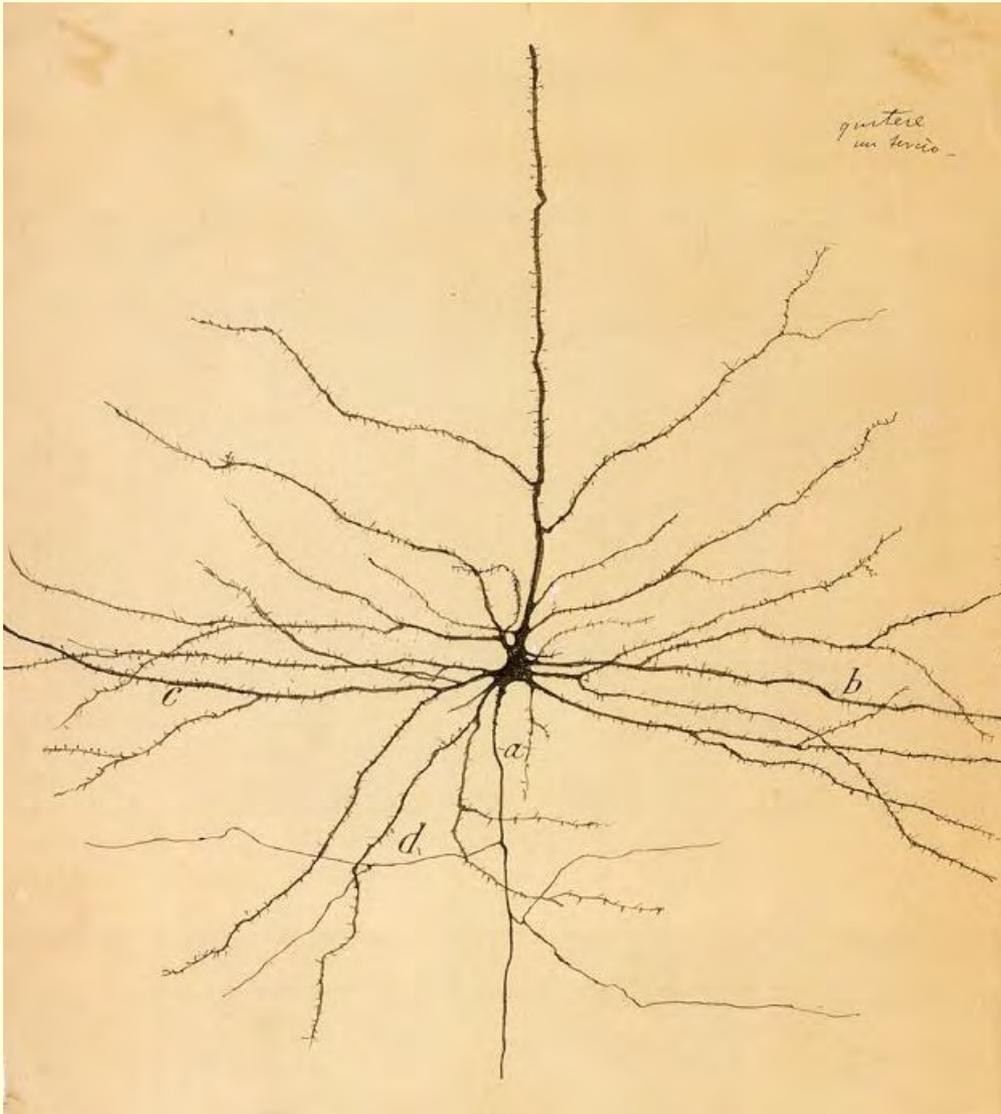
Ramon y Cajal



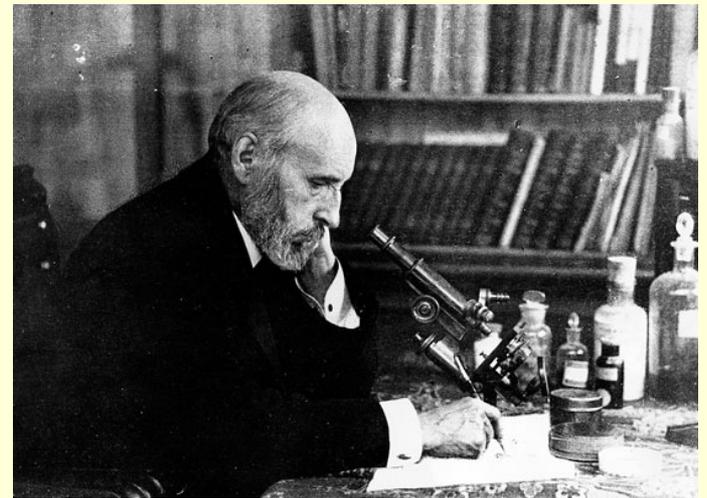
À cette époque,

le paradigme dominant était encore que le système nerveux était constitué d'un **maillage fusionné**

ne comportant **pas de cellules isolées.**



Mais Cajal va montrer, à l'aide de la coloration de Golgi, que les neurones semblent plutôt former des cellules distinctes les unes des autres.

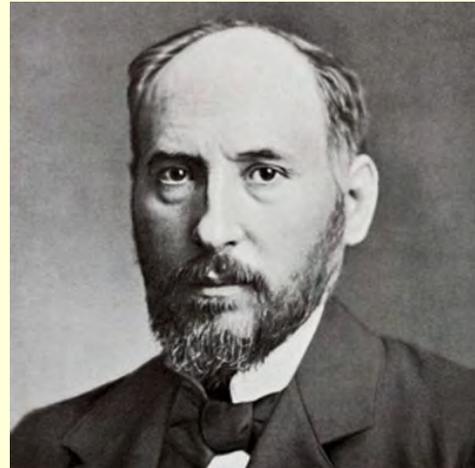


Neurone pyramidal du cortex moteur

Golgi et Cajal obtiennent le Prix Nobel de physiologie ou médecine en 1906.

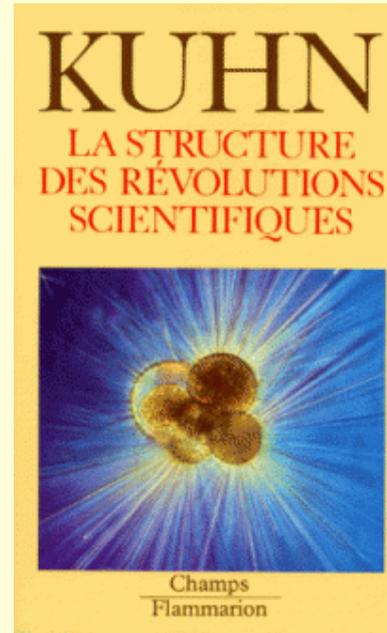


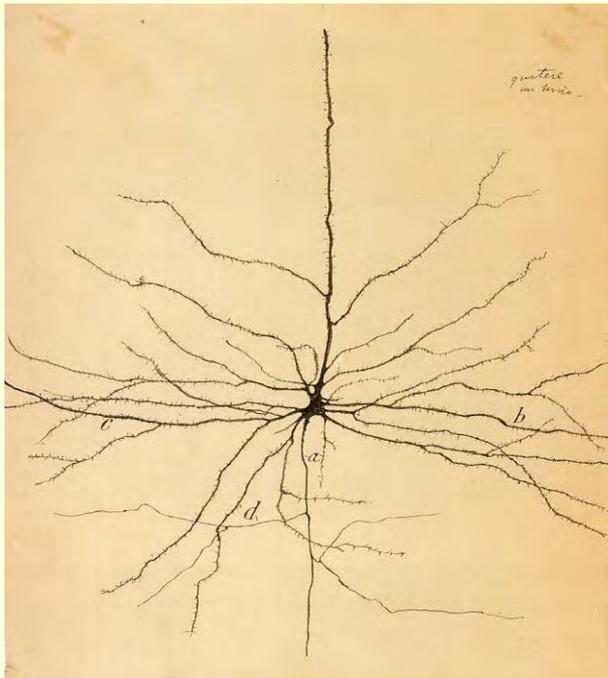
Dans son discours de réception du prix, Golgi défendit la **théorie réticulaire**.



Cajal, qui parlait après lui, contredit la position de Golgi et exposa sa **théorie du neurone...**

qui fut bientôt admise.





Neurone pyramidal du cortex moteur

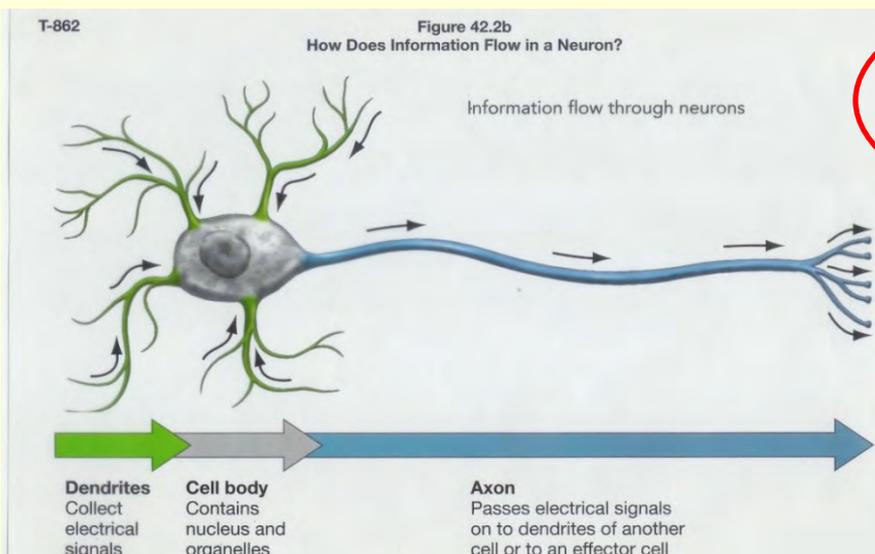
## La théorie (ou doctrine) du neurone :

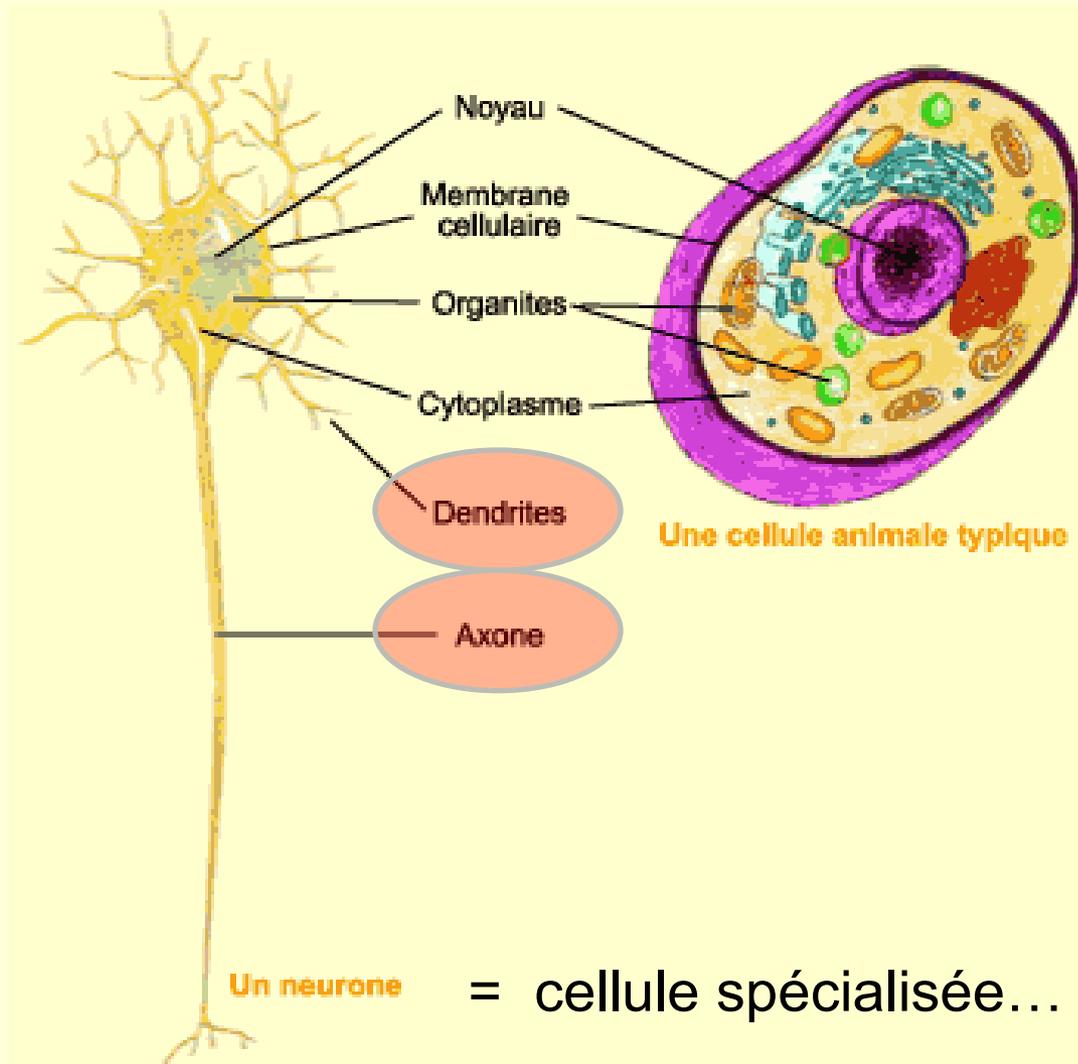
1) **Le neurone** est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles**;

3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone**;

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).

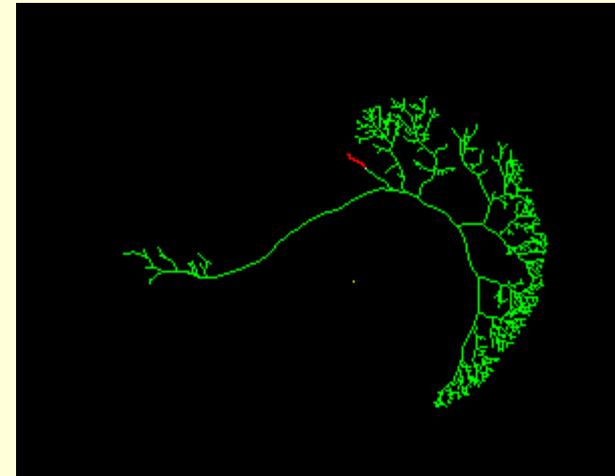
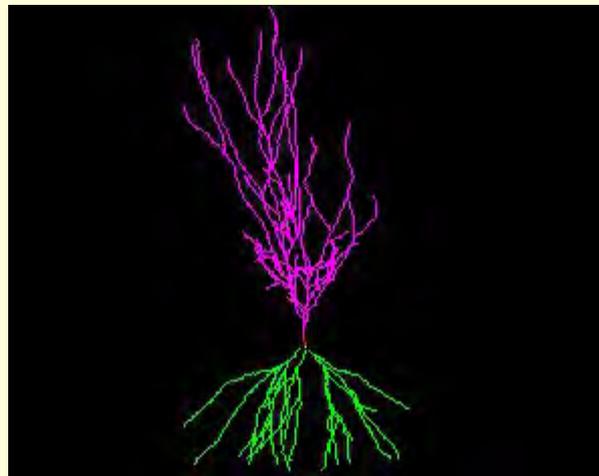
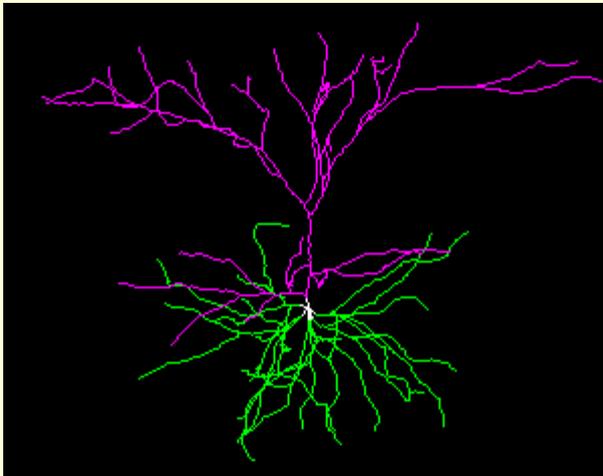


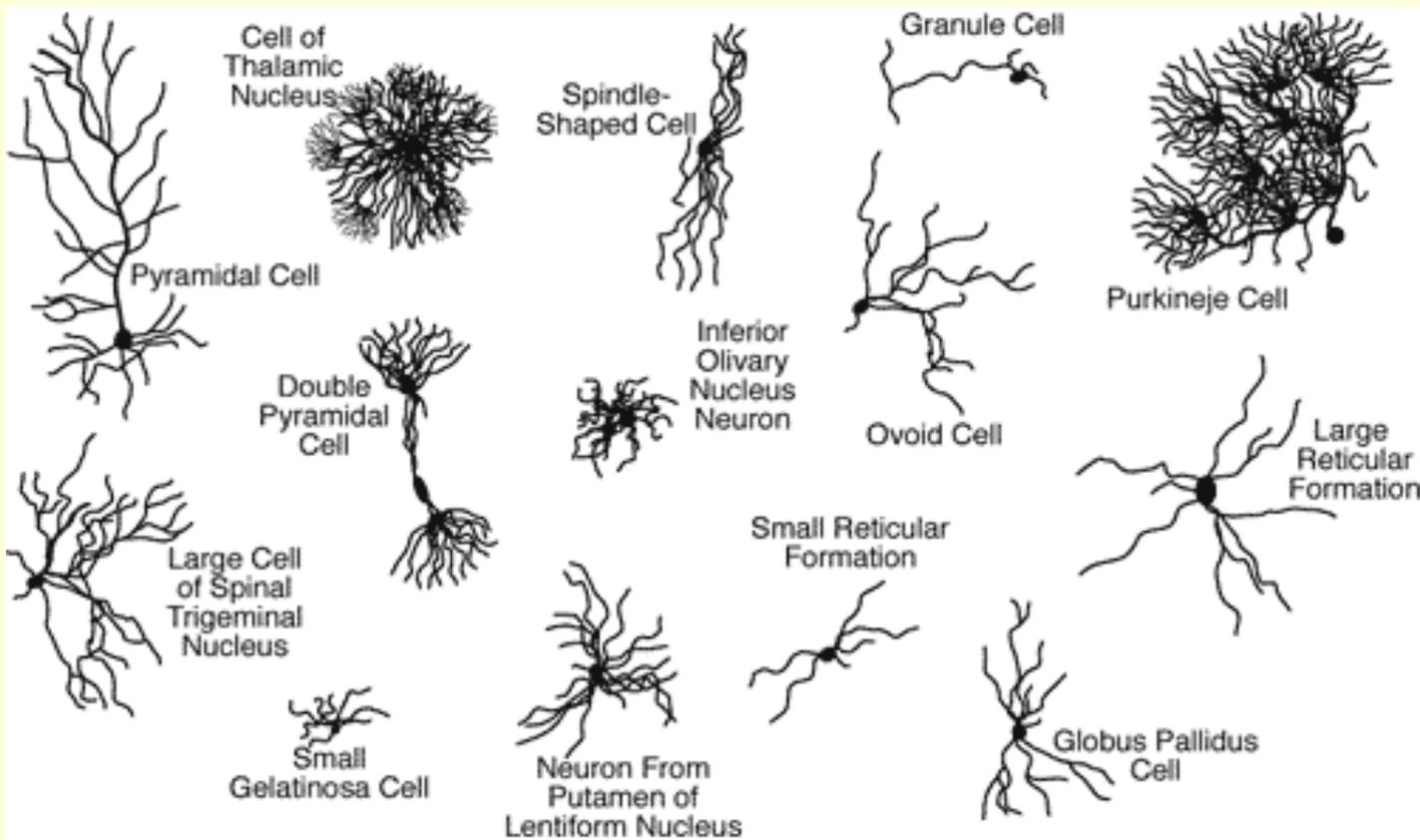


## Les mille et un visages du neurone

L'image typique d'un neurone utilisée pour en présenter les prolongements particuliers (axone et dendrites) fait parfois oublier l'incroyable diversité de formes que peuvent prendre les cellules nerveuses.

Pour vous en convaincre, allez faire un tour sur le site web [www.NeuroMorpho.Org](http://www.NeuroMorpho.Org)

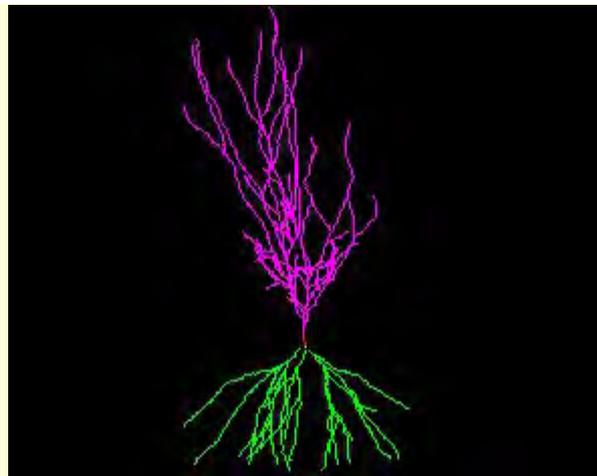
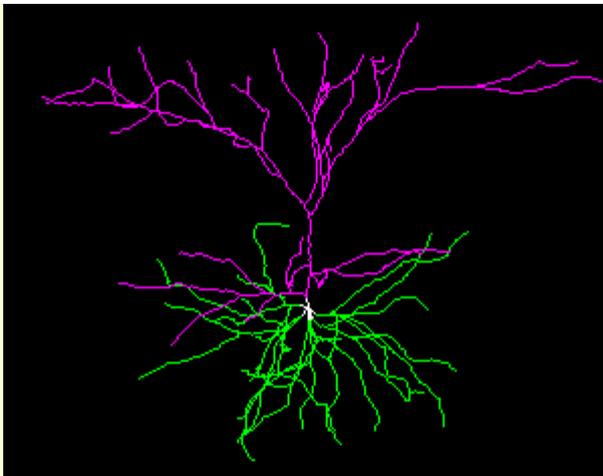




Très grande variabilité de forme et de taille dont la géométrie varie selon le rôle du neurone dans le circuit nerveux.

On estime à plus de 1 000 au moins le nombre de types de neurones différents

(et peut-être beaucoup plus, voire un continuum de types...).





Certains « **arbres dendritiques** » peuvent recevoir des inputs de milliers de neurones différents, jusqu'à 100 000 pour certains.

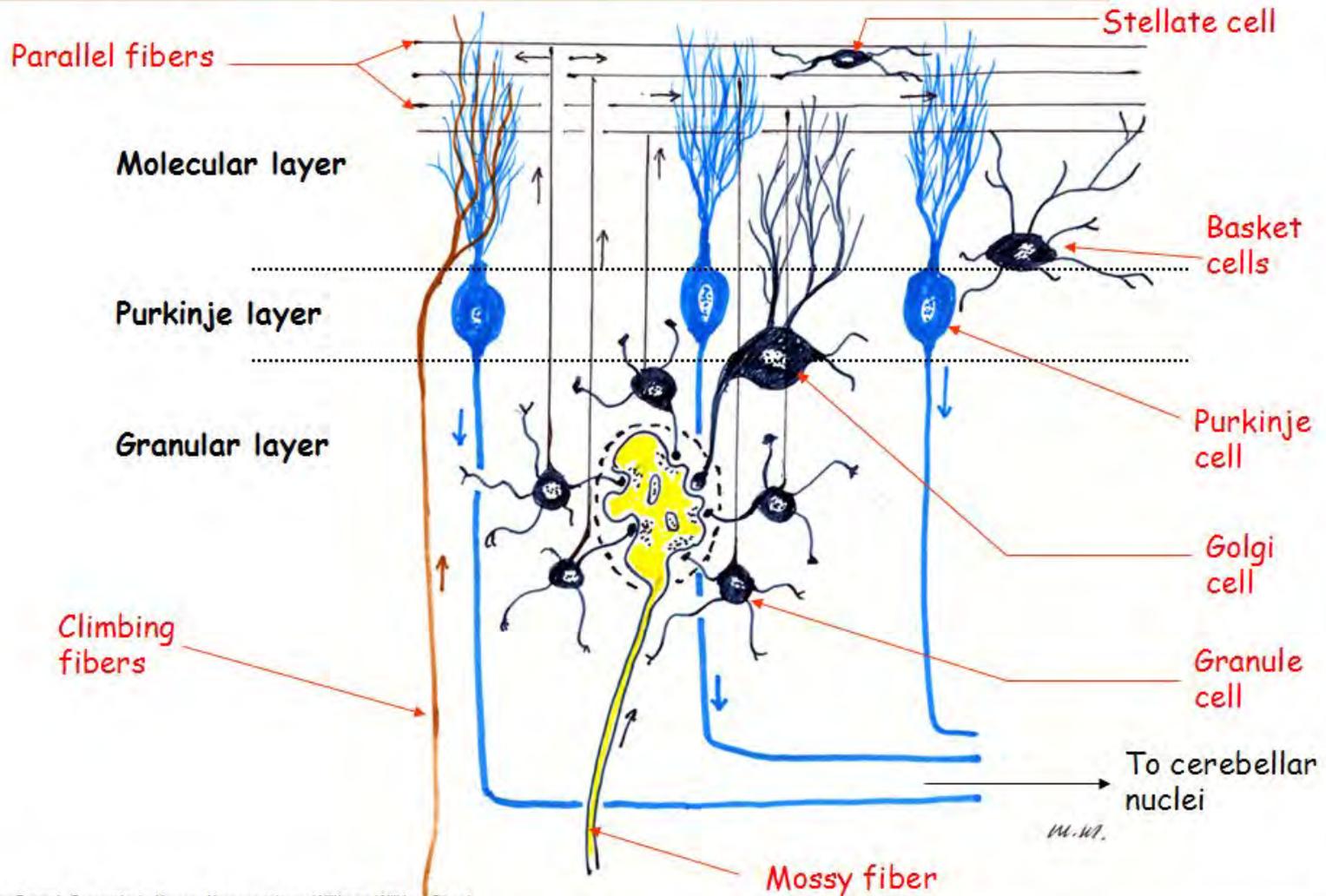
**Vast Complexity of Dendrite Function**

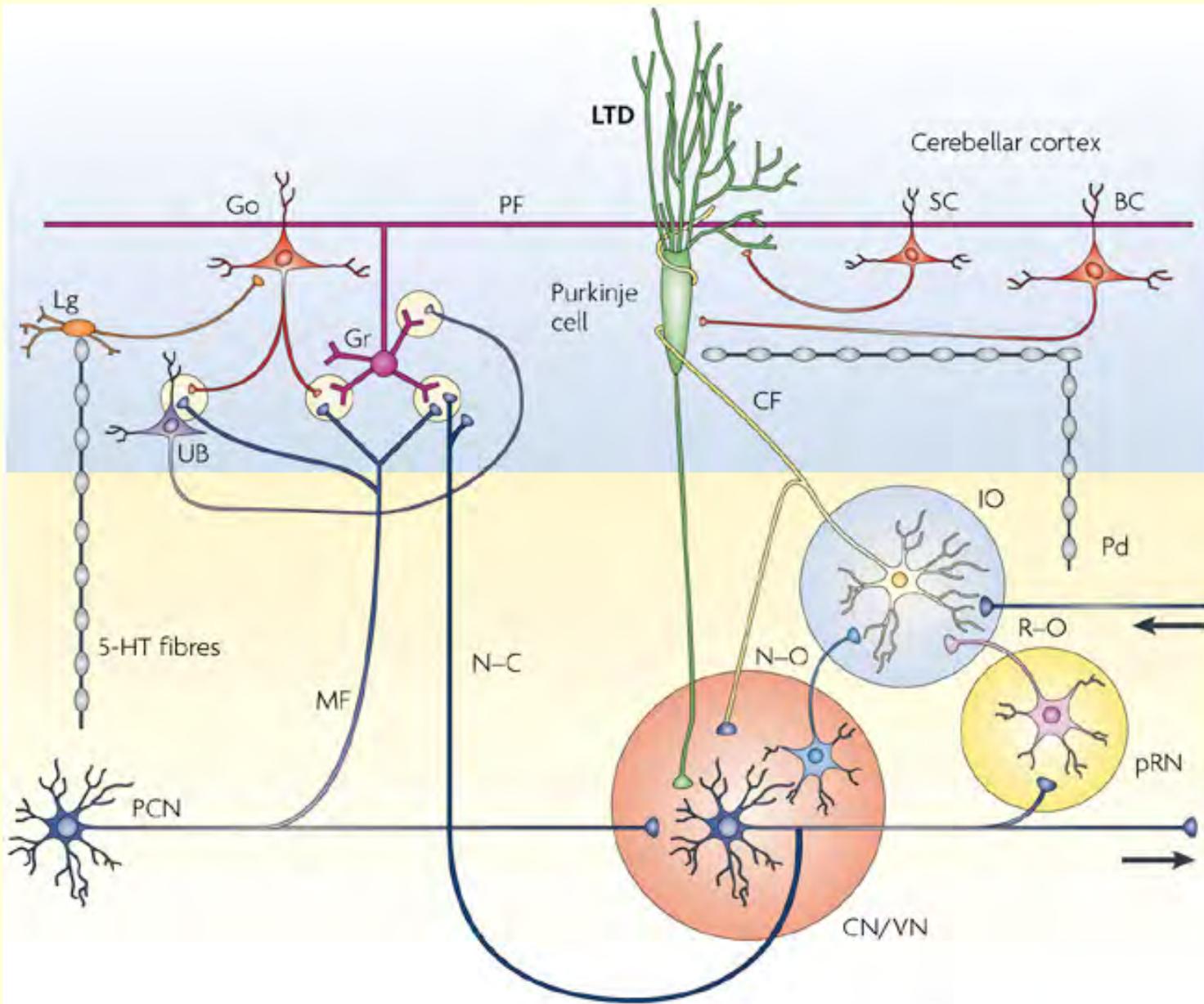
**August 23, 2015** , by Jon Lieff

[http://jonlieffmd.com/blog/vast-complexity-of-dendrite-function?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=b0ed5cb680-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-b0ed5cb680-94278693](http://jonlieffmd.com/blog/vast-complexity-of-dendrite-function?utm_source=General+Interest&utm_campaign=b0ed5cb680-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-b0ed5cb680-94278693)

Grande variabilité de forme aussi selon son pattern de connexion avec les autres neurones, qui lui-même dépend de la fonction de cette voie nerveuse.

## Functional Organization of Cerebellum



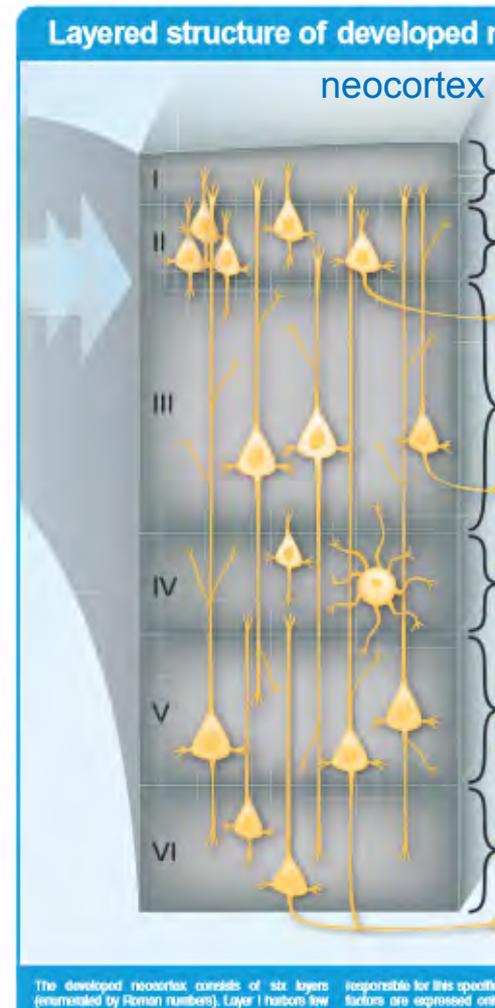
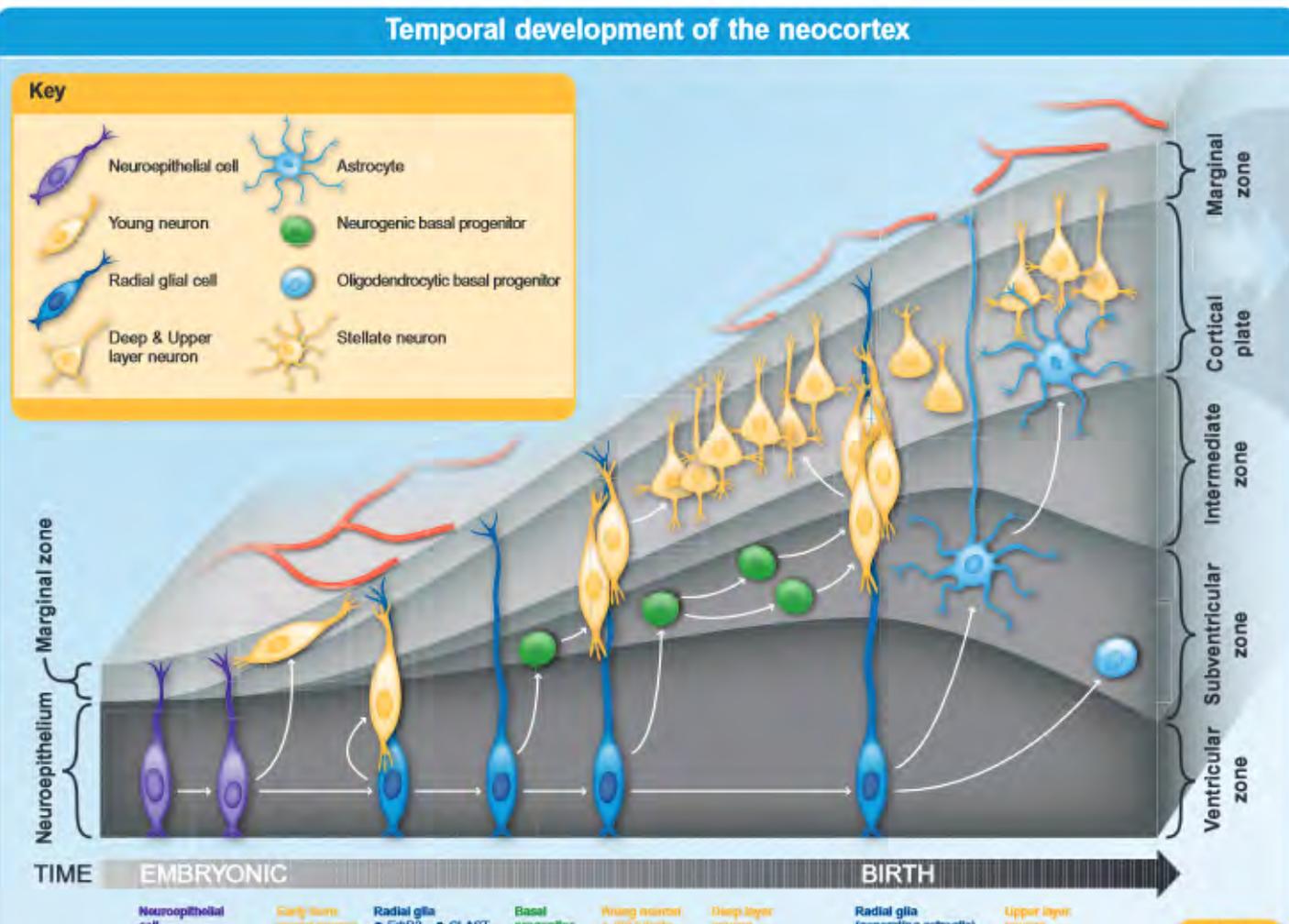


Tout cela se met en place durant le développement embryonnaire par des processus de guidage complexes impliquant d'innombrables molécules.

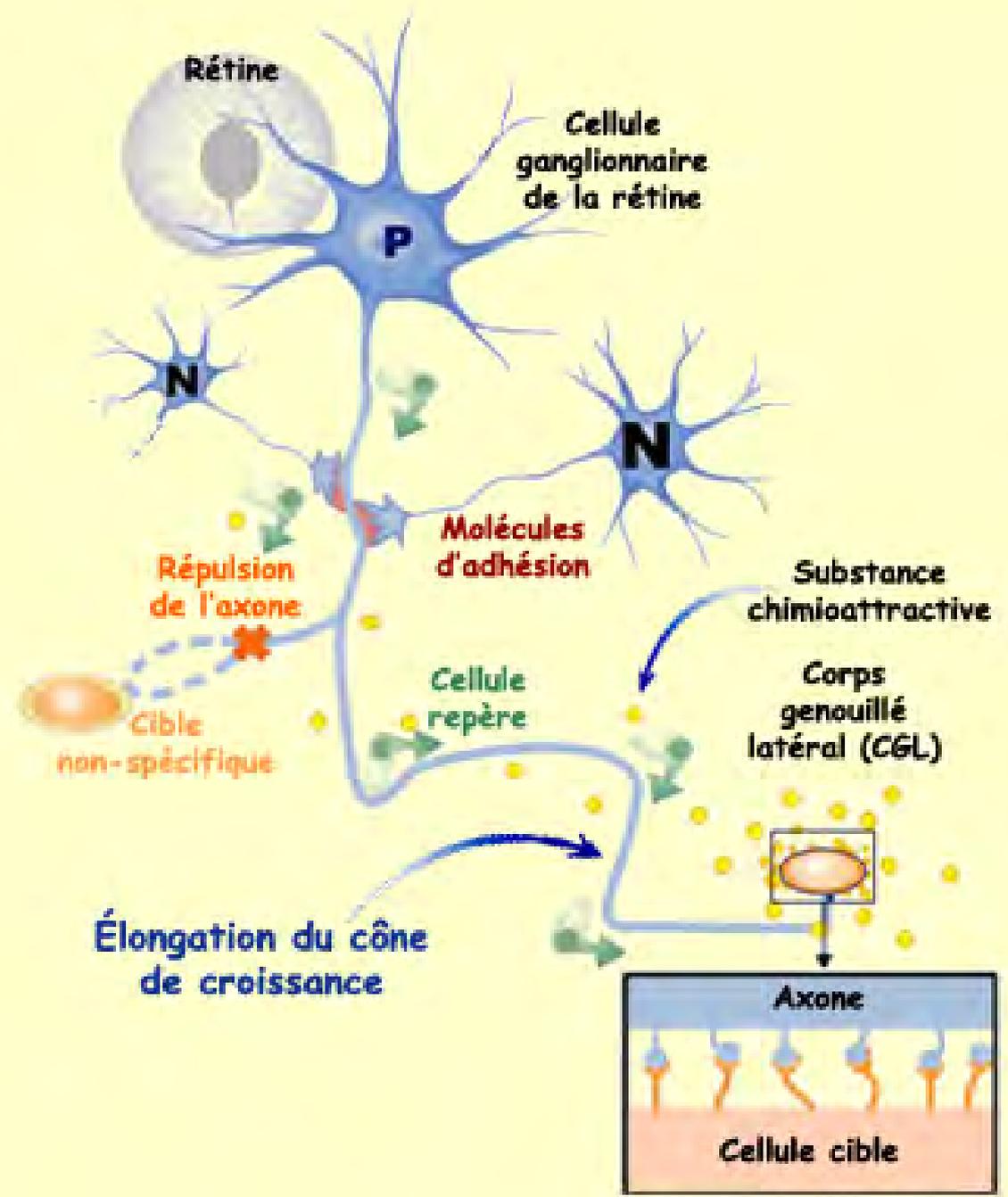
[ on ne va pas aborder le développement du cerveau par manque de temps mais... ]

...mais en 2 diapos,  
disons seulement que :

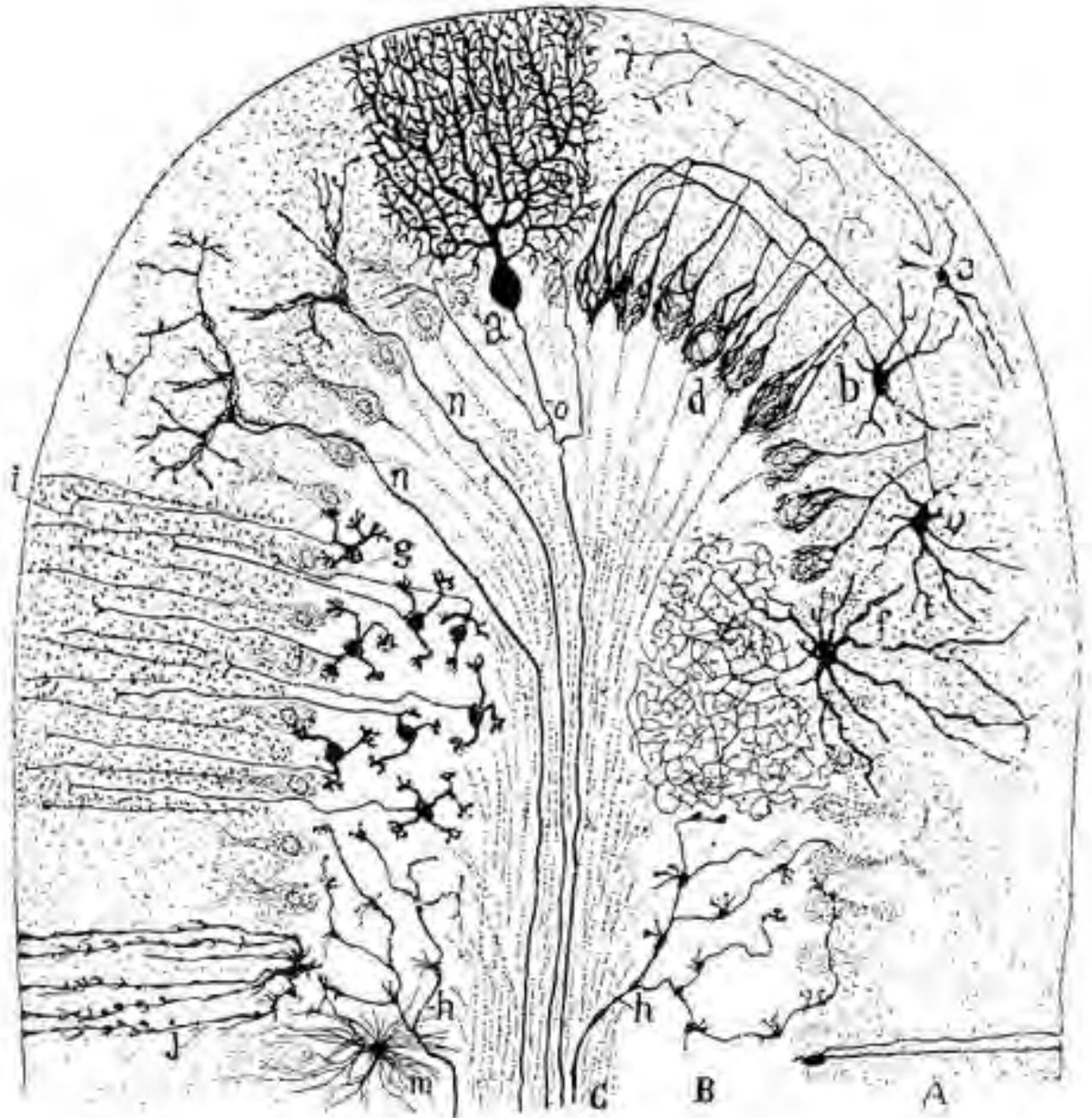
1) cela va globalement donner lieu à une véritable chorégraphie permettant par exemple ici aux **6 couches du cortex** de se structurer correctement.

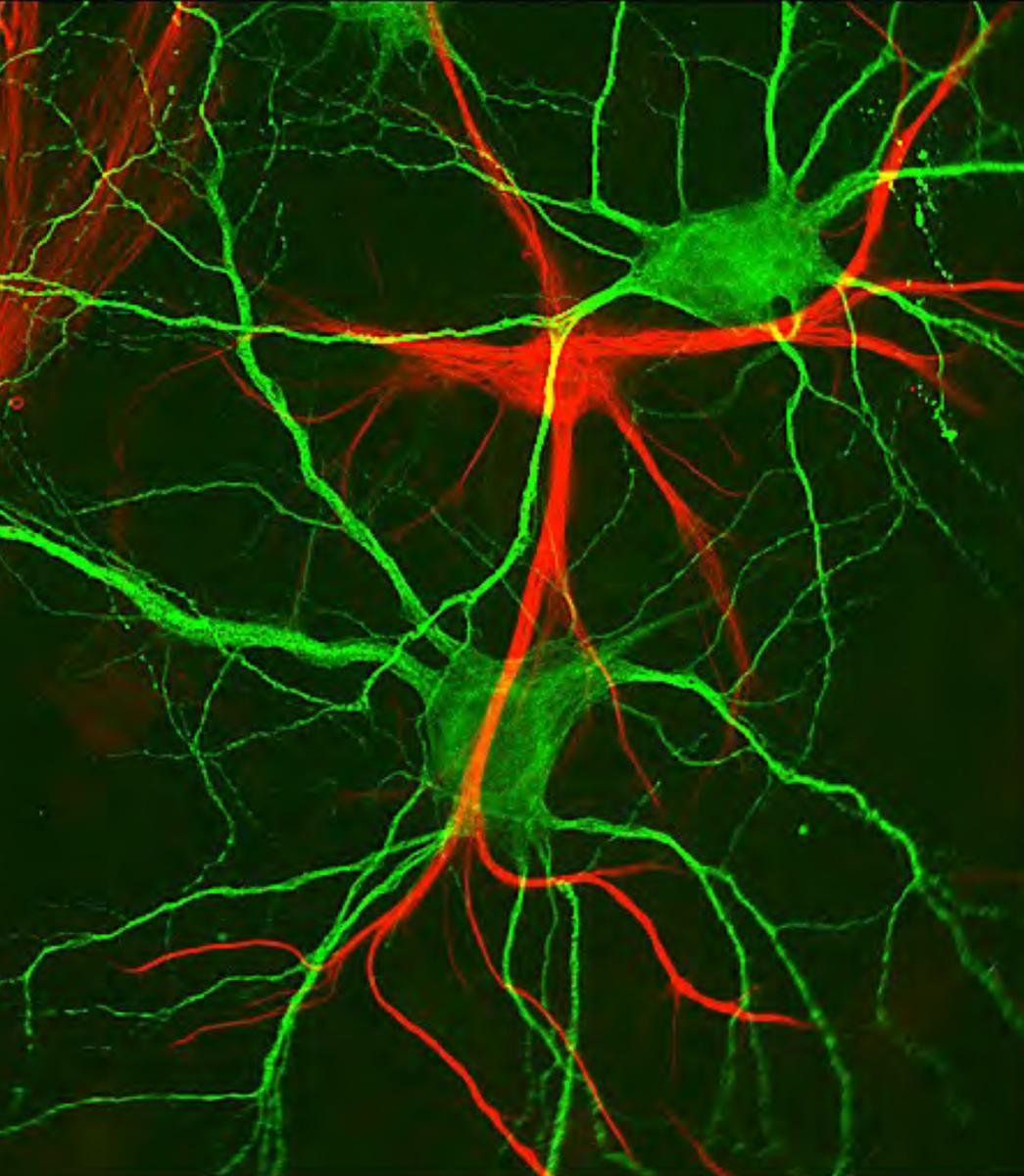


2) une fois le neurone positionné, différents mécanismes vont permettre aux axones d'atteindre leur **cellule cible**;



Revenons à la **théorie du neurone** avec le premier dessin connu des neurones du cervelet, de Santiago Ramon y Cajal (1852-1934).





## La théorie du neurone :

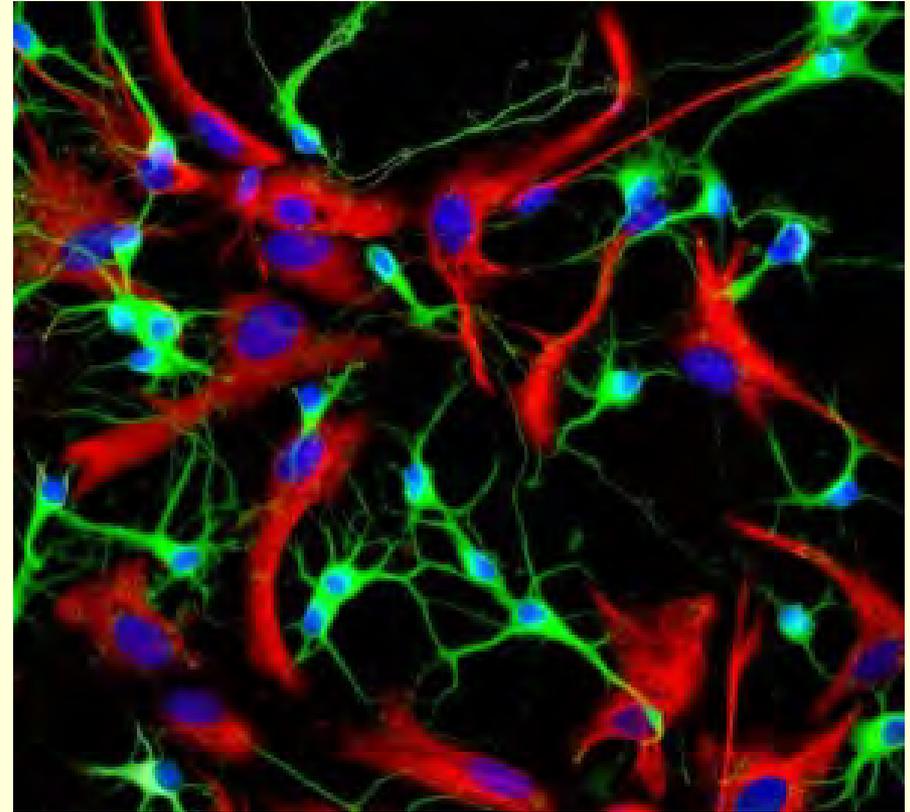
1) ~~Le neurone~~ est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

Il y a aussi « l'autre moitié du cerveau » :

**les cellules gliales !**

(en rouge ici,  
et les neurones en vert)

Les cellules gliales, encore en rouge ici



**85 000 000 000**  
**cellules gliales**

Cellules qui  
n'émettent pas  
d'influx nerveux...

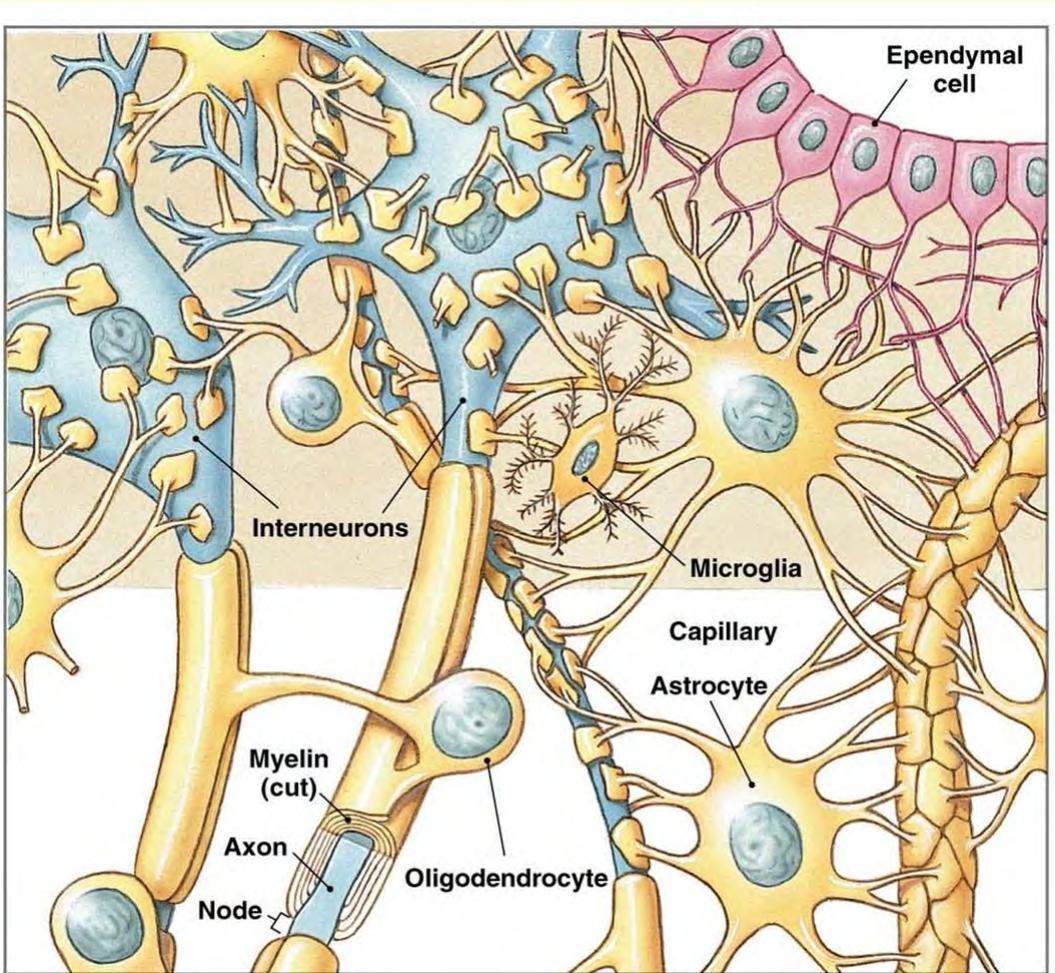


...a-t-on toujours dit  
jusqu'à récemment...

**85 000 000 000**  
**neurones !**



# Différents types de cellules gliales



**En une phrase :**  
(on va détailler plus loin...)

Les **astrocytes** approvisionnent les neurones en nutriments et assurent l'équilibre du milieu extracellulaire.

La **microglie** : les macrophages du cerveau.

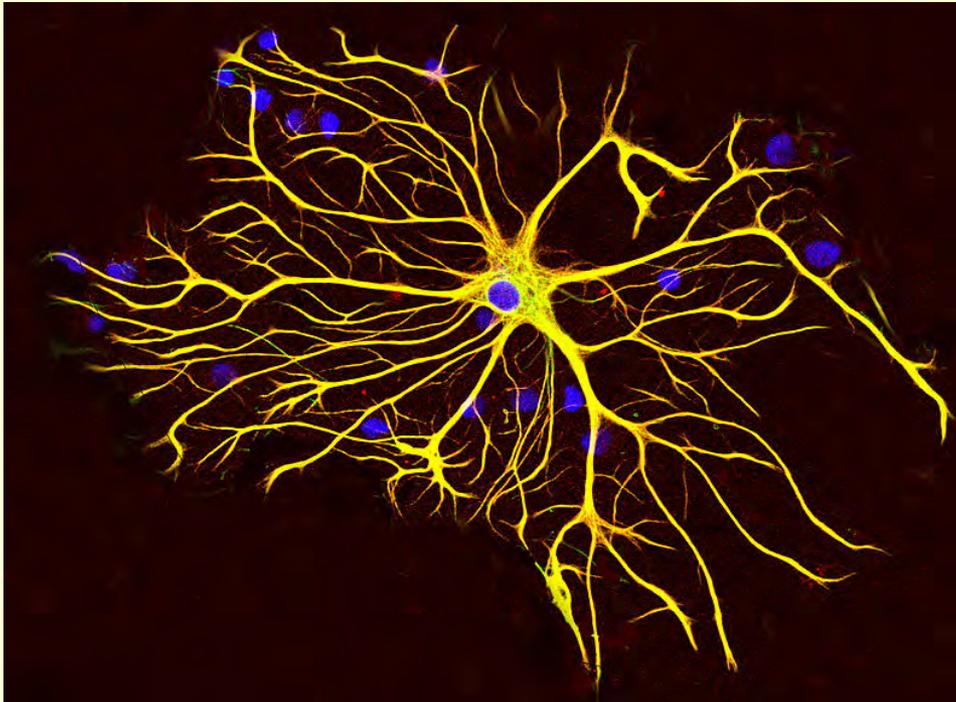
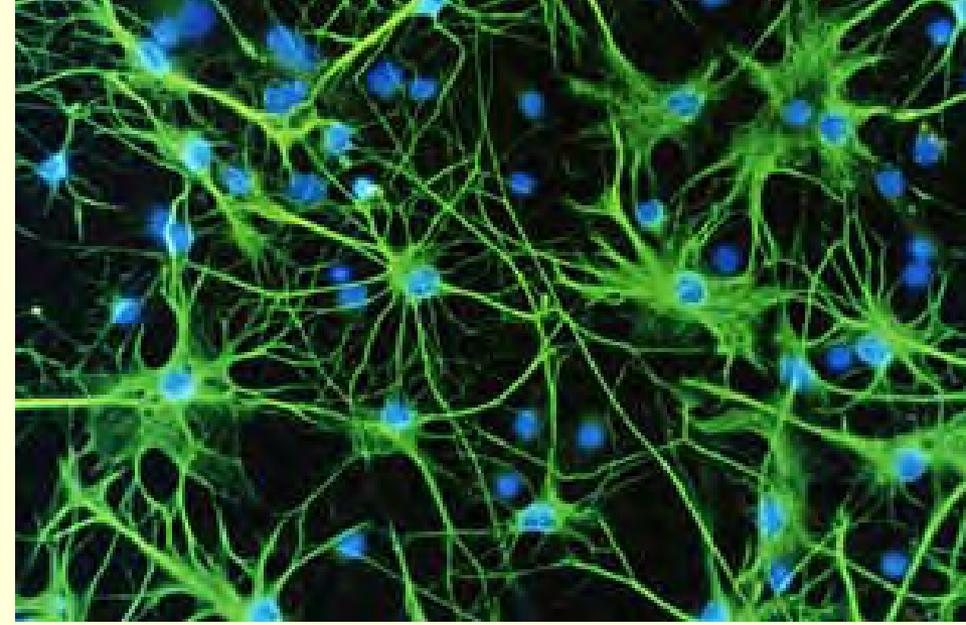
Les **oligodendrocytes** constituent la gaine de myéline qui entourent les axones de nombreux neurones.

# Astrocytes

## Fantastic Astrocyte Diversity

August 2, **2015**

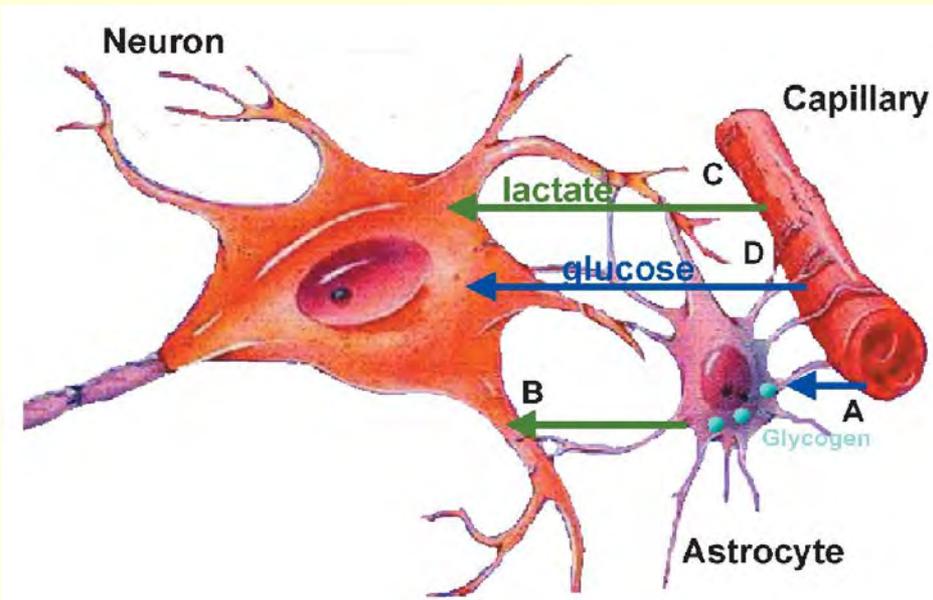
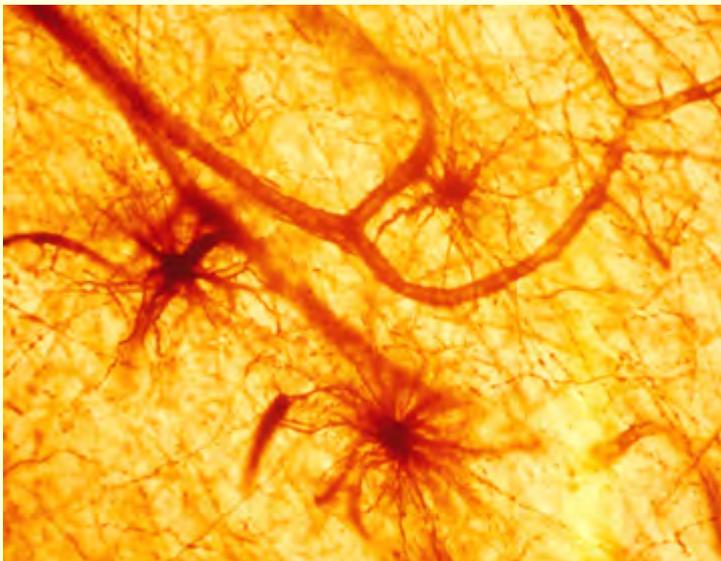
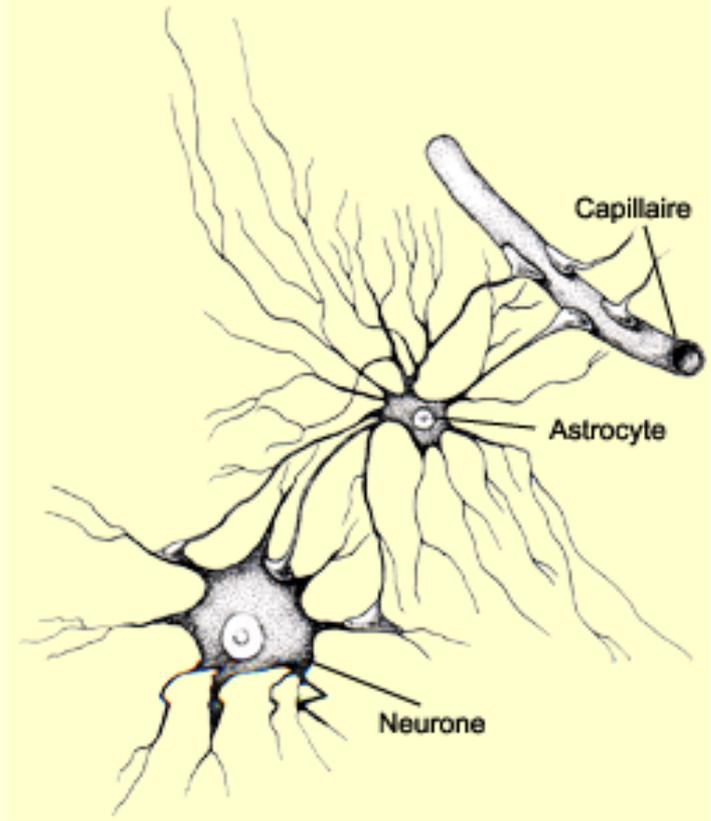
[http://jonlieffmd.com/blog/fantastic-astrocyte-diversity?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=3a0ae2f9c3-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-3a0ae2f9c3-94278693](http://jonlieffmd.com/blog/fantastic-astrocyte-diversity?utm_source=General+Interest&utm_campaign=3a0ae2f9c3-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-3a0ae2f9c3-94278693)



## Astrocytes

On connaît depuis longtemps leur rôle de pourvoyeur du glucose nécessaires à l'activité nerveuse.

Grâce à leurs "pieds" apposés contre la paroi des capillaires sanguins cérébraux, le glucose peut pénétrer dans les astrocytes où il est partiellement métabolisé et retransmis aux neurones.



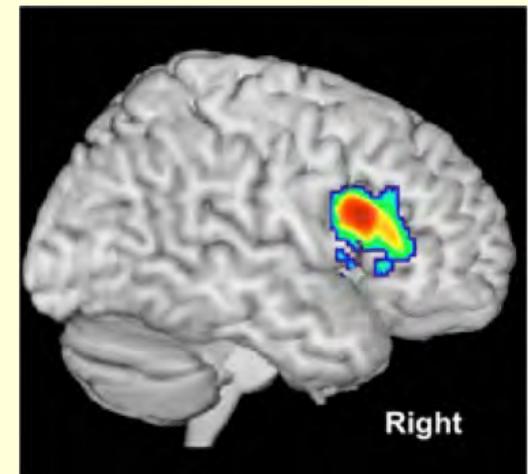
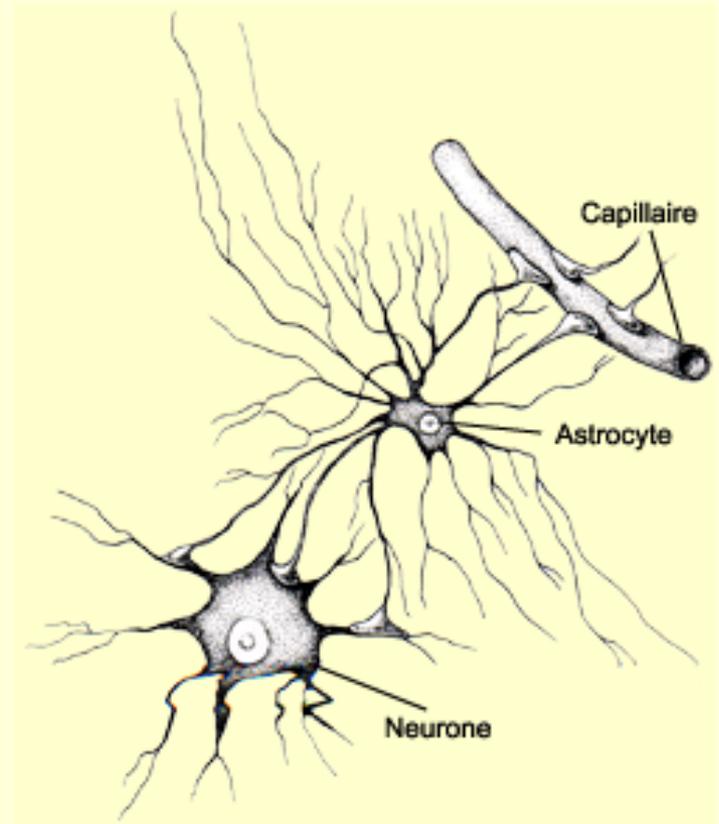
## Astrocytes

On connaît depuis longtemps leur rôle de pourvoyeur du glucose nécessaires à l'activité nerveuse.

Grâce à leurs "pieds" apposés contre la paroi des capillaires sanguins cérébraux, le glucose peut pénétrer dans les astrocytes où il est partiellement métabolisé et retransmis aux neurones.

On sait qu'une activité neuronale plus intense dans une région du cerveau favorise un apport plus élevé de glucose **en activant le travail des astrocytes.**

C'est d'ailleurs le phénomène exploité par l'imagerie cérébrale...



Plusieurs découvertes sur les astrocytes  
depuis une ou deux décennies montrent qu'ils  
**n'assurent définitivement pas qu'un rôle  
de soutien ou de nutrition !**

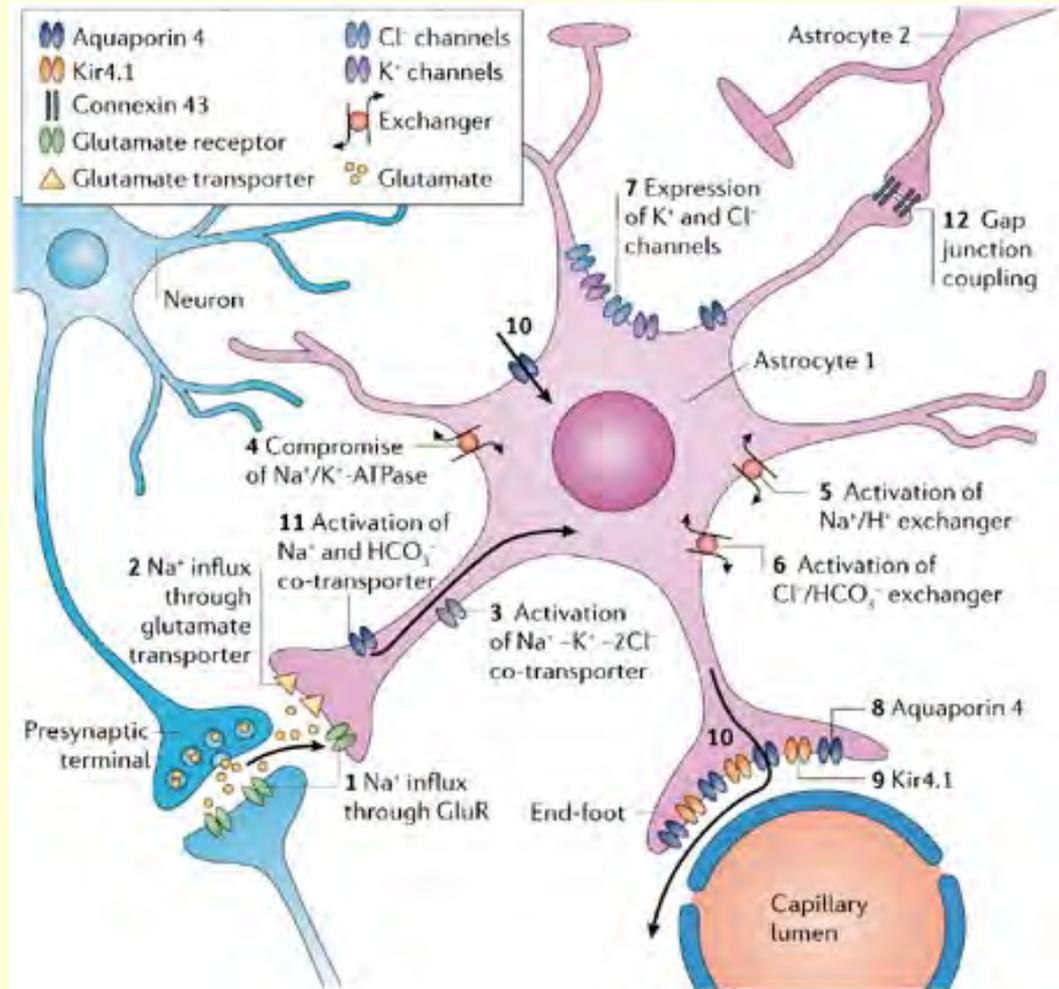
# Glutamate Released from Glial Cells Synchronizes Neuronal Activity in the Hippocampus

María Cecilia Angulo, Andreï S. Kozlov, Serge Charpak, and Etienne Audinat. *The Journal of Neuroscience*,

4 August 2004.

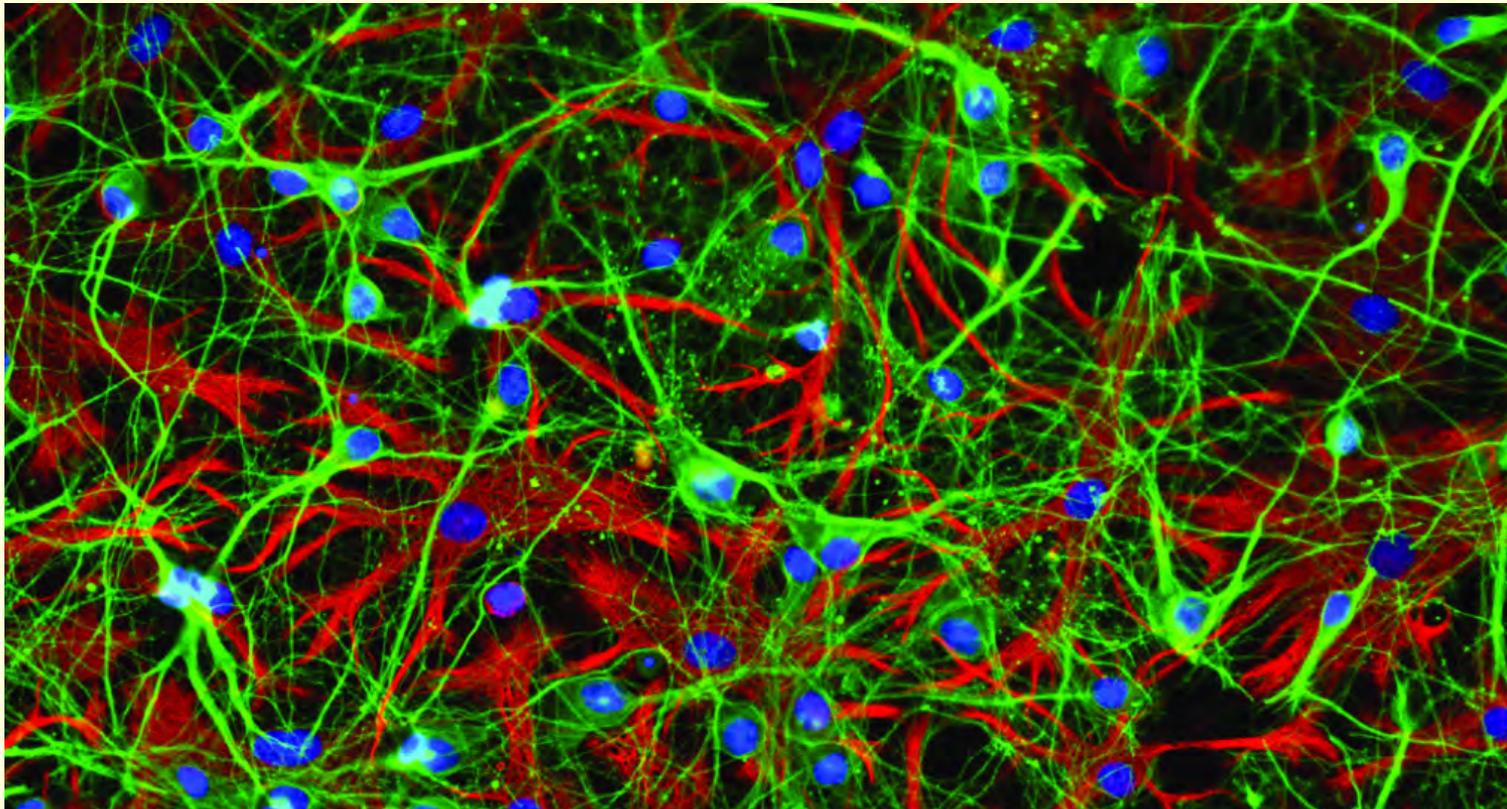
Cet article démontre que du **glutamate** relâché par des cellules gliales génère un courant transitoire

dans les neurones pyramidaux d'hippocampe de rats par l'entremise de **récepteurs NMDA**.

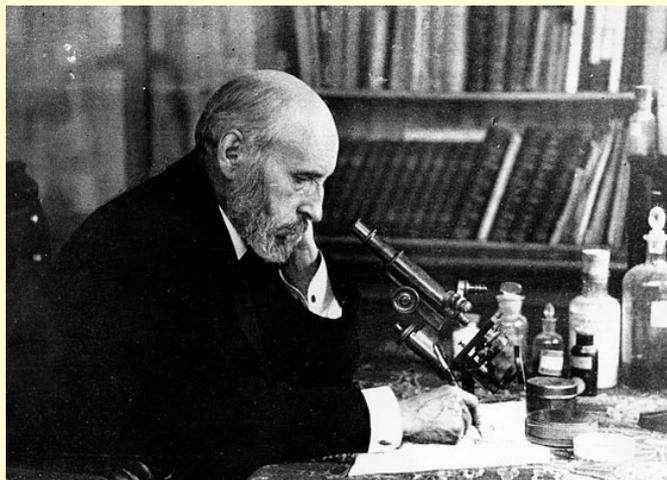


Un astrocyte peut être connecté à des milliers de différents neurones, pouvant ainsi contrôler leur excitabilité grâce à **ce réseau encore plus grand que celui formé par les neurones.**

Le glutamate relâché par les cellules gliales pourrait ainsi contribuer à **synchroniser** l'activité neuronale dans l'hippocampe.



*Neurons and astrocytes isolated from rat hippocampus stained for DNA (blue), neuronal-specific  $\beta$ III-tubulin (green) and **astrocyte-specific GFAP (red).***



## La théorie (ou doctrine) du neurone :

1) **Le neurone** est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles**;

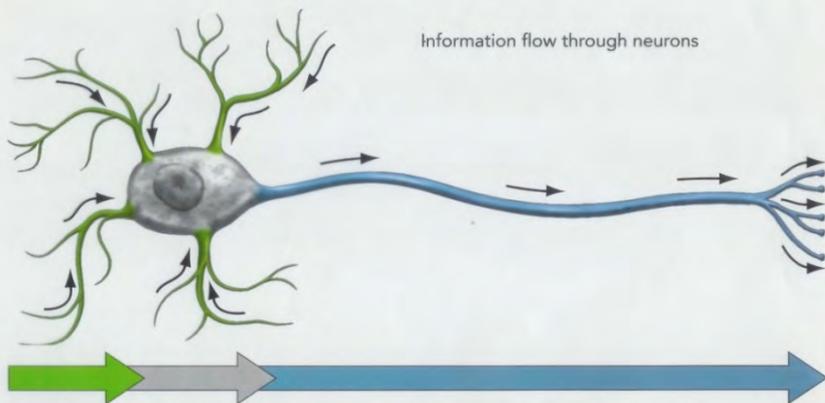
3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone**;

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).

T-862

Figure 42.2b  
How Does Information Flow in a Neuron?

Information flow through neurons



**Dendrites**

Collect electrical signals

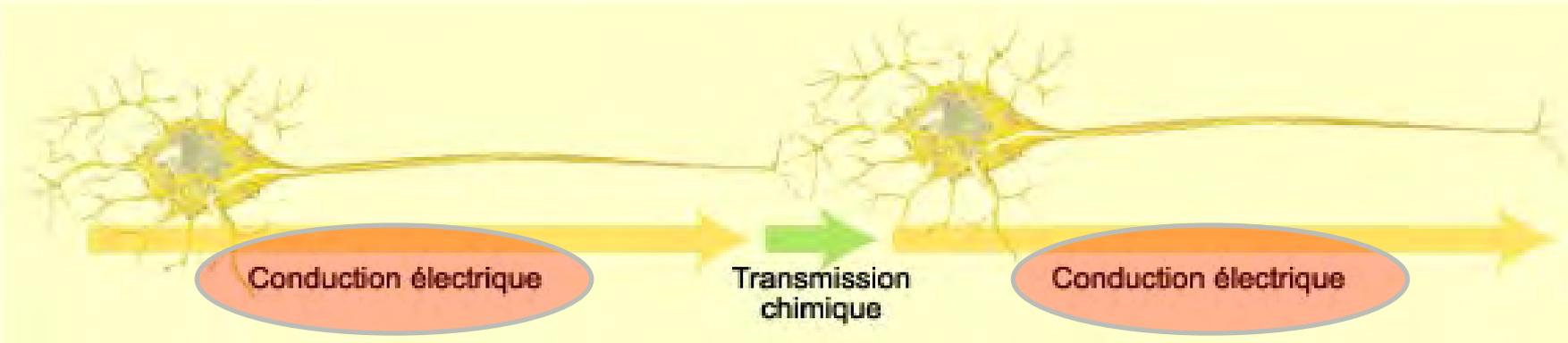
**Cell body**

Contains nucleus and organelles

**Axon**

Passes electrical signals on to dendrites of another cell or to an effector cell

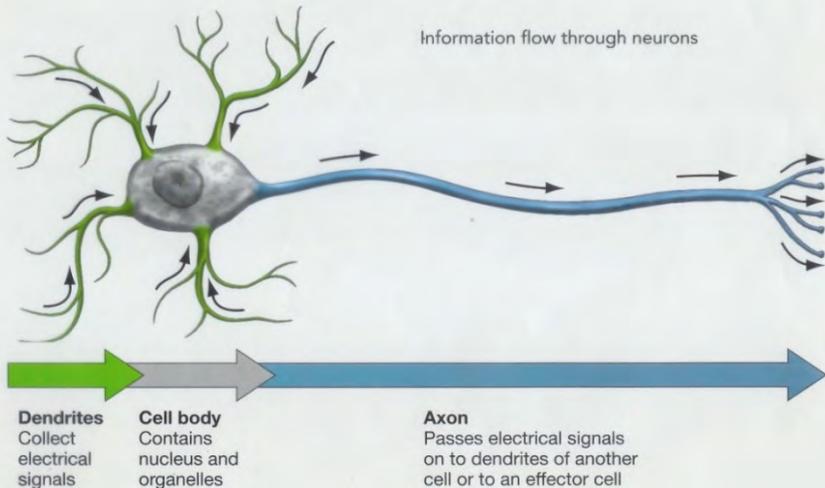
# Les neurones ont des dendrites et des axones pour communiquer rapidement avec d'autres neurones



T-862

Figure 42.2b  
How Does Information Flow in a Neuron?

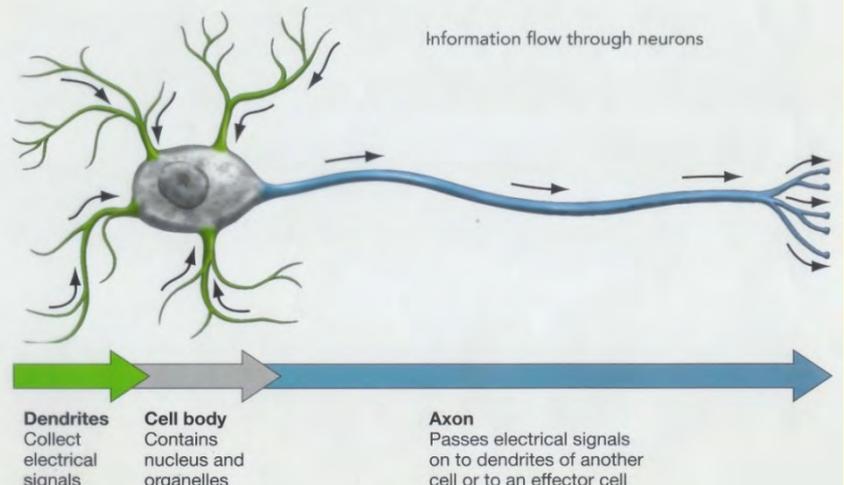
Information flow through neurons

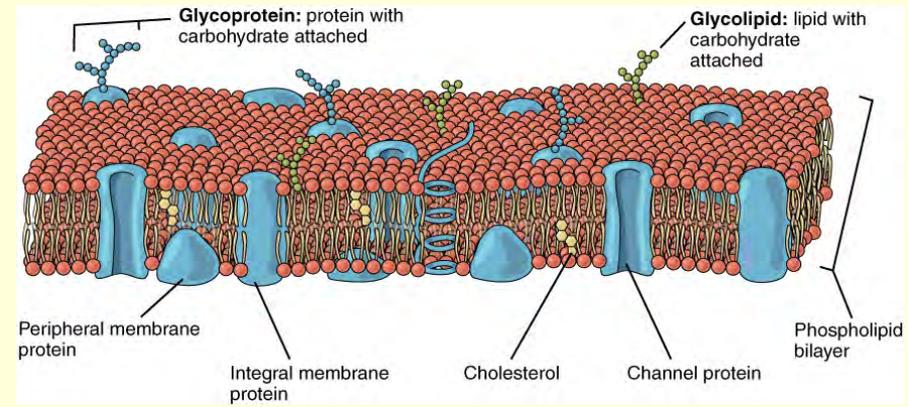
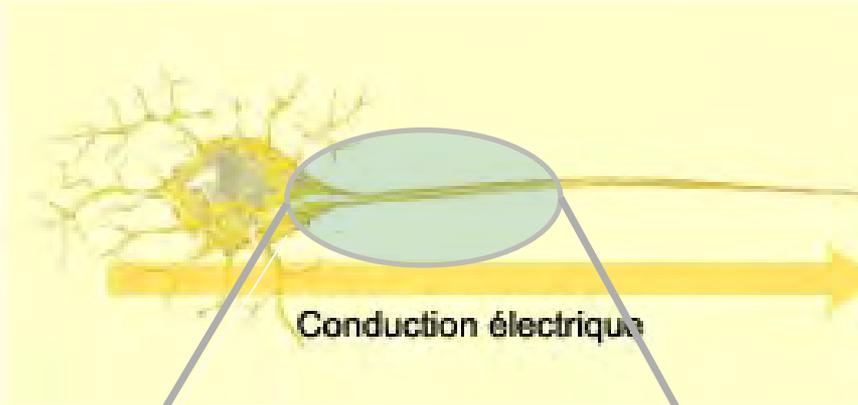


T-862

Figure 42.2b  
How Does Information Flow in a Neuron?

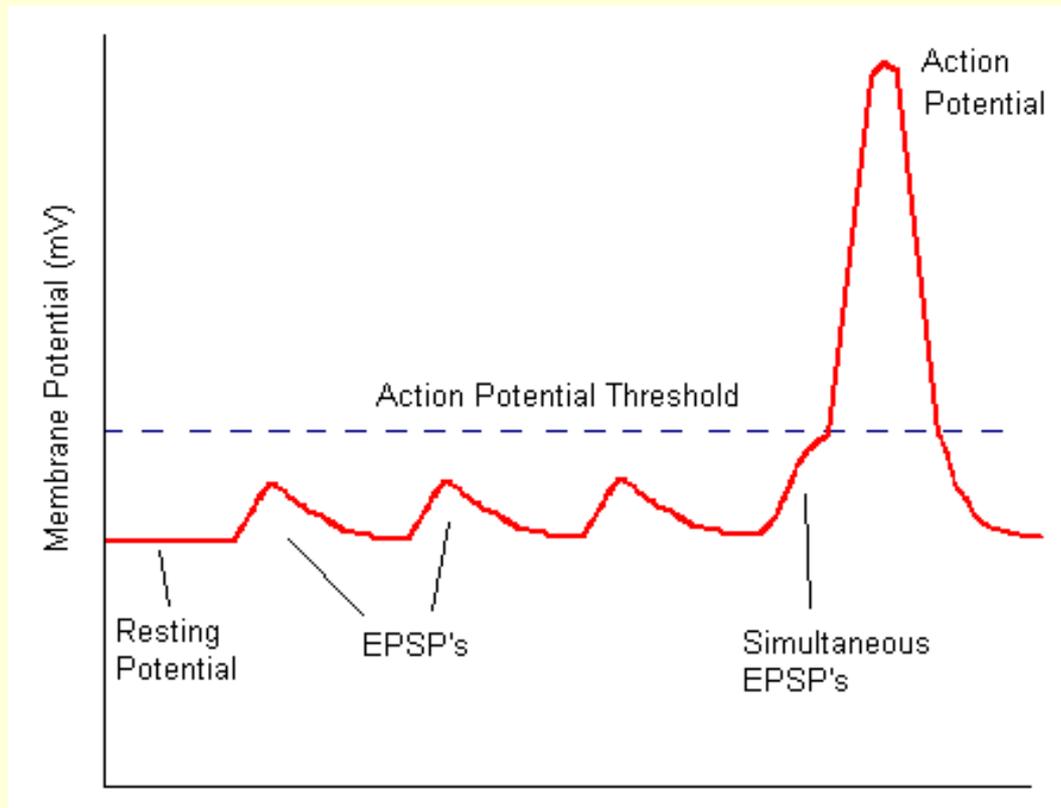
Information flow through neurons

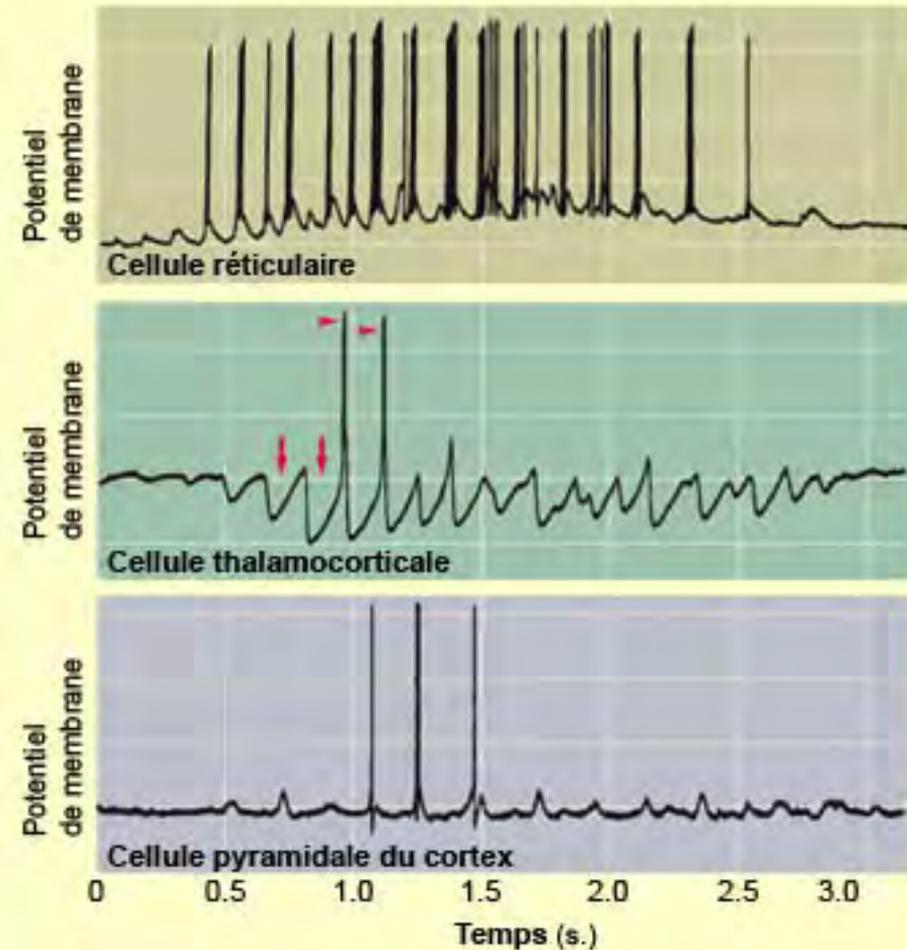
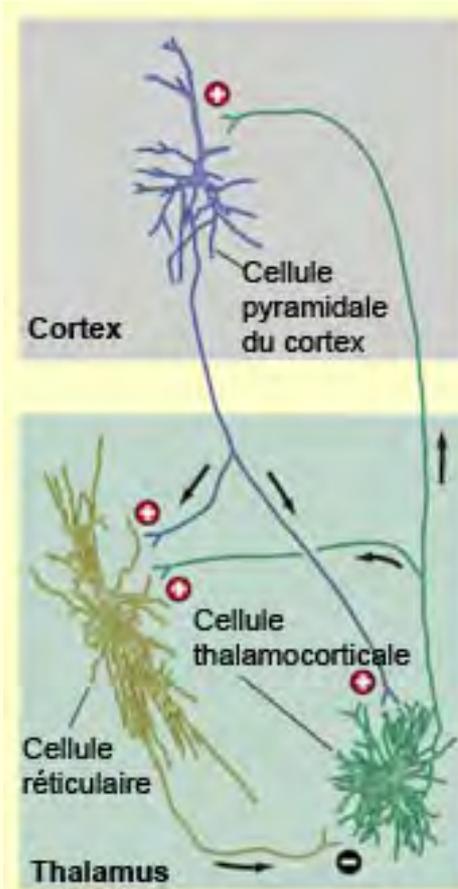






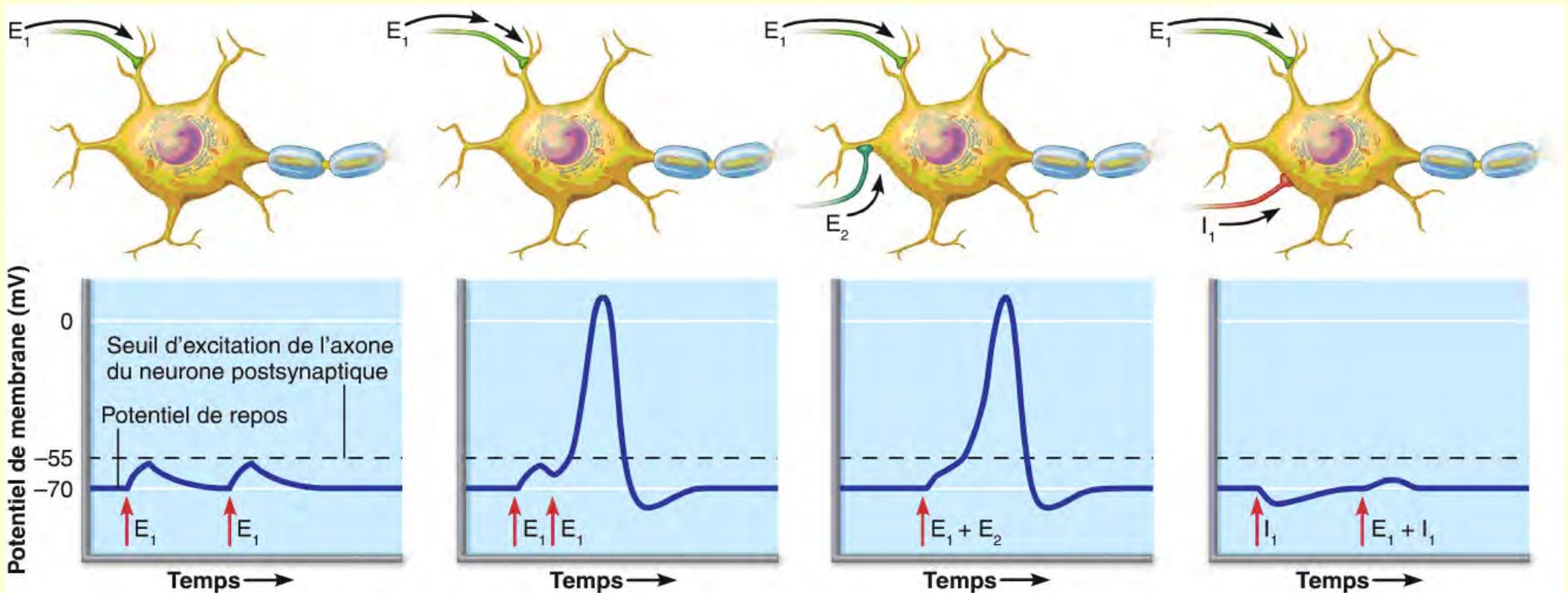
le « **potentiel d'action** », que l'on visualise ainsi sur un oscilloscope, se déclenche de manière « **tout ou rien** » quand l'excitation atteint un certain **seuil**





Grâce à leurs prolongements, les neurones créent des **réseaux très interconnectés** où l'activité d'un neurone peut influencer l'activité de plusieurs autres

« Le fait qu'une cellule vivante se soit adaptée en une structure capable de recevoir et **d'intégrer** des données, de **prendre des décisions** fondées sur ces données, et **d'envoyer des signaux** aux autres cellules en fonction du résultat de cette intégration est un exploit remarquable de l'évolution. »

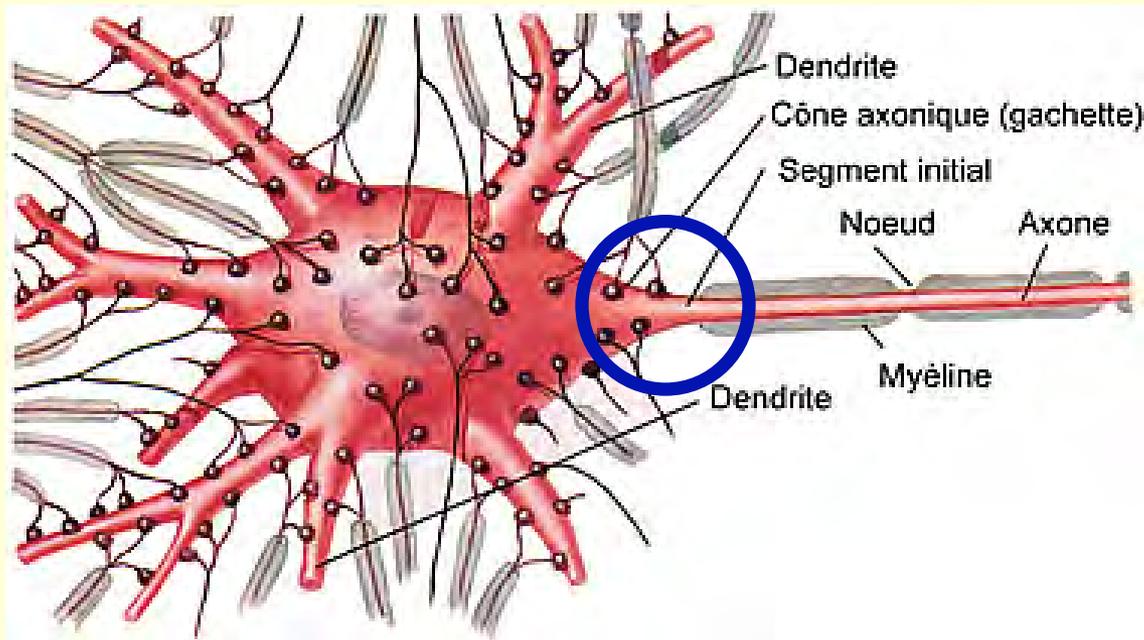


(a) **Pas de sommation ou stimulus infralaminaires:**  
Pas de sommation des PPSE lorsque deux stimulus sont séparés dans le temps.

(b) **Sommation temporelle:**  
Sommation des PPSE lorsque deux stimulus sont rapprochés dans le temps.

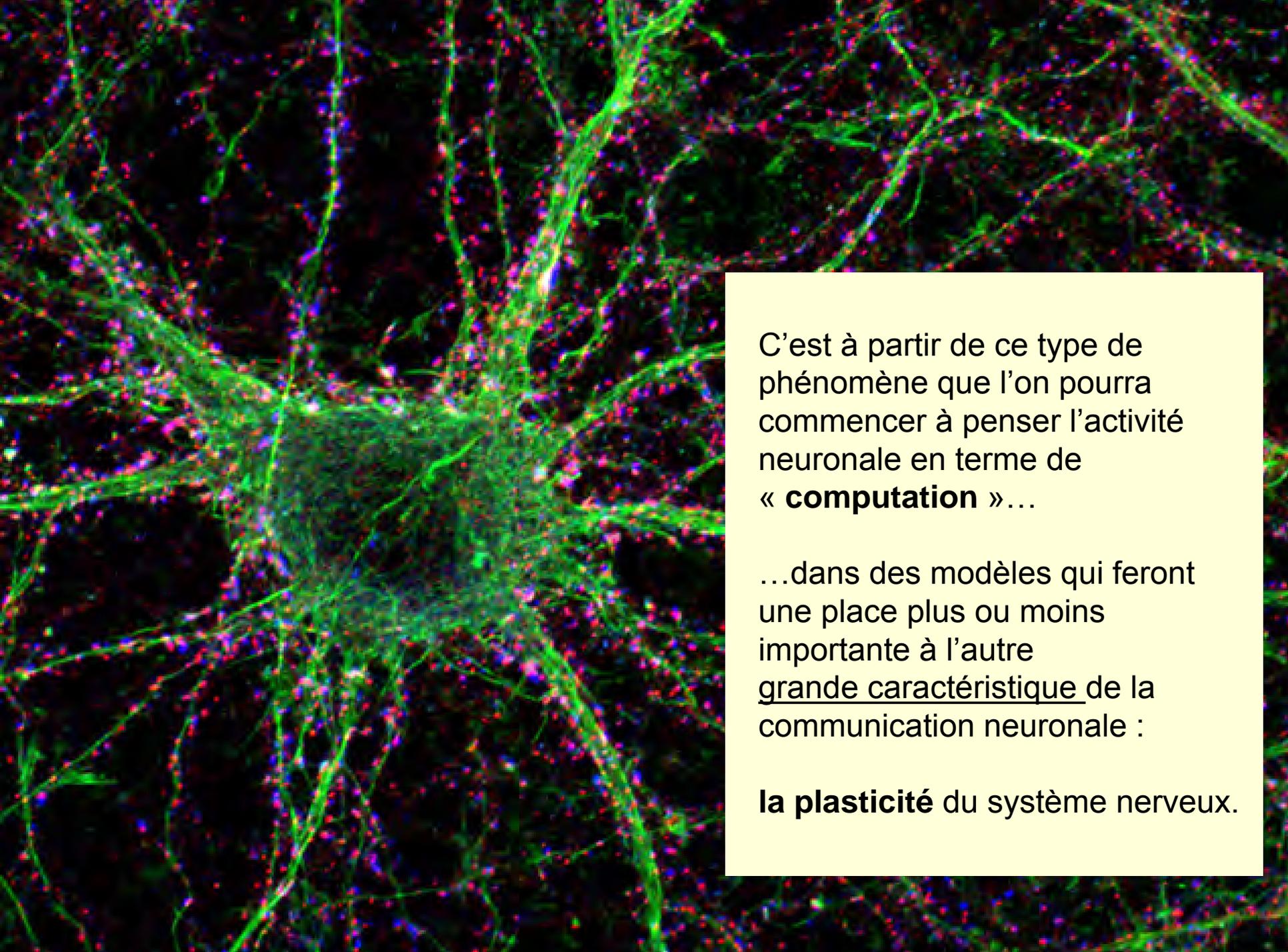
(c) **Sommation spatiale:**  
Sommation des PPSE lorsque deux stimulus se produisent simultanément.

(d) **Sommation spatiale du PPSE et du PPSI:** Annulation possible des changements de potentiel de membrane.



De petits potentiels excitateurs ou inhibiteurs sont donc **constamment générés** sur les dendrites et le corps cellulaire du neurone suite à la fixation des neurotransmetteurs sur leurs récepteurs.

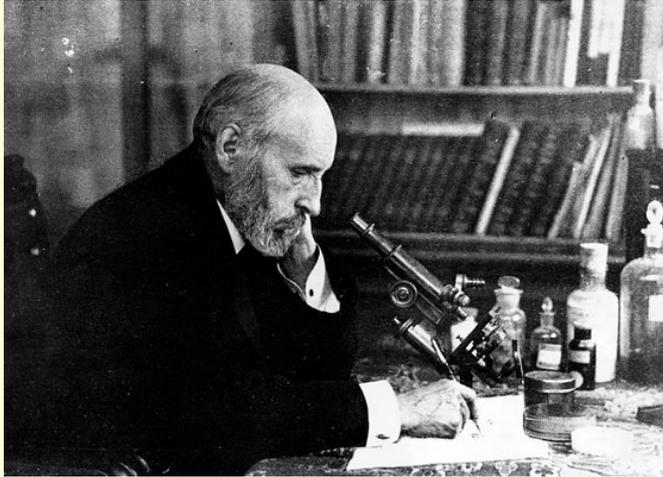
Et plus la dépolarisation se fera au niveau proximal des dendrites (près du corps cellulaire, de la **zone gâchette**), plus cette dépolarisation sera susceptible d'engendrer un potentiel d'action.



C'est à partir de ce type de phénomène que l'on pourra commencer à penser l'activité neuronale en terme de « **computation** »...

...dans des modèles qui feront une place plus ou moins importante à l'autre grande caractéristique de la communication neuronale :

**la plasticité** du système nerveux.



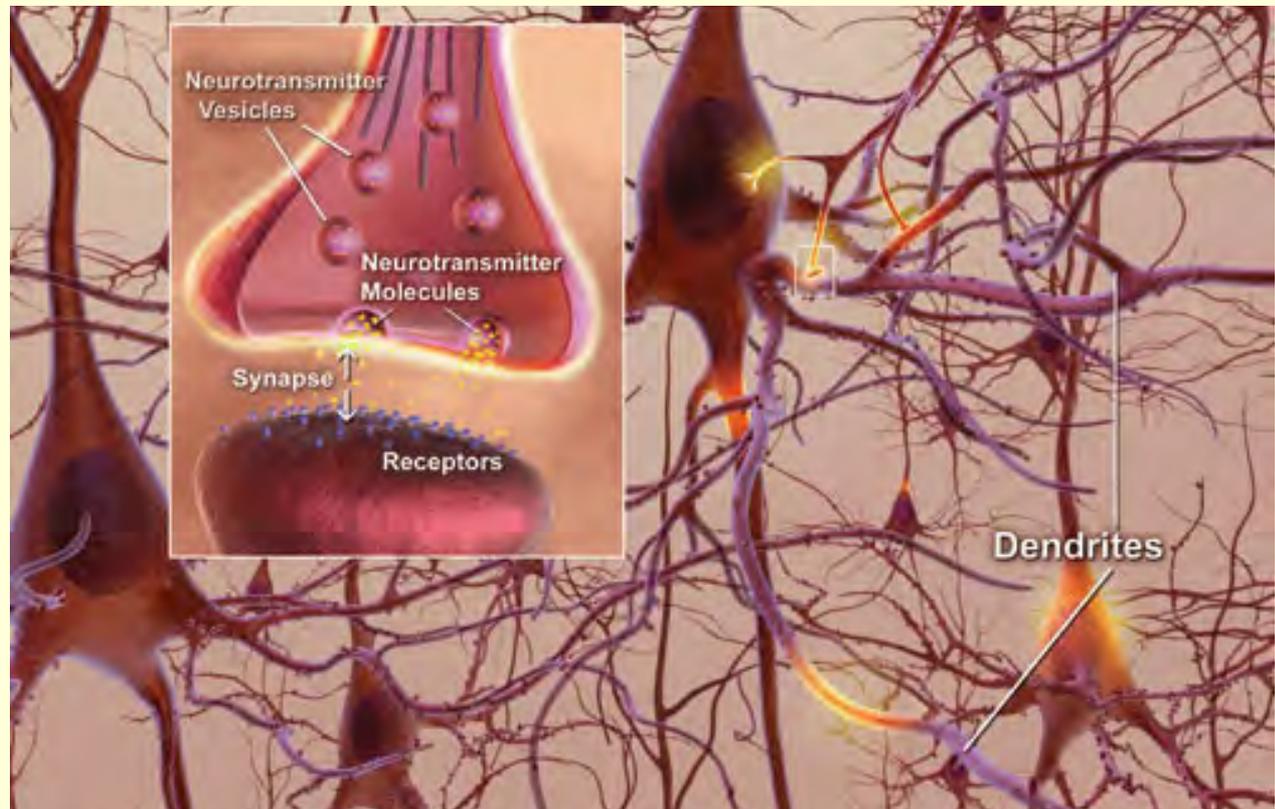
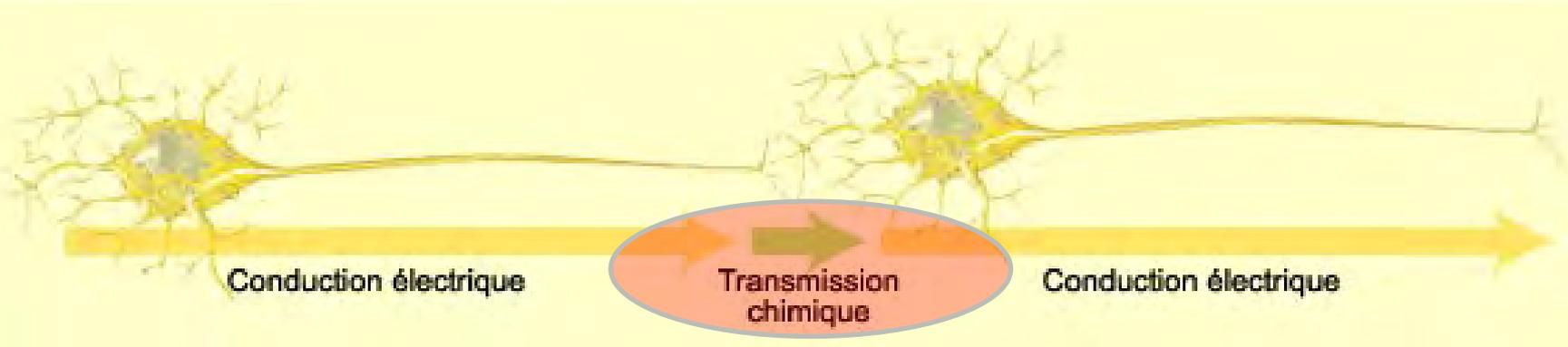
## La théorie (ou doctrine) du neurone :

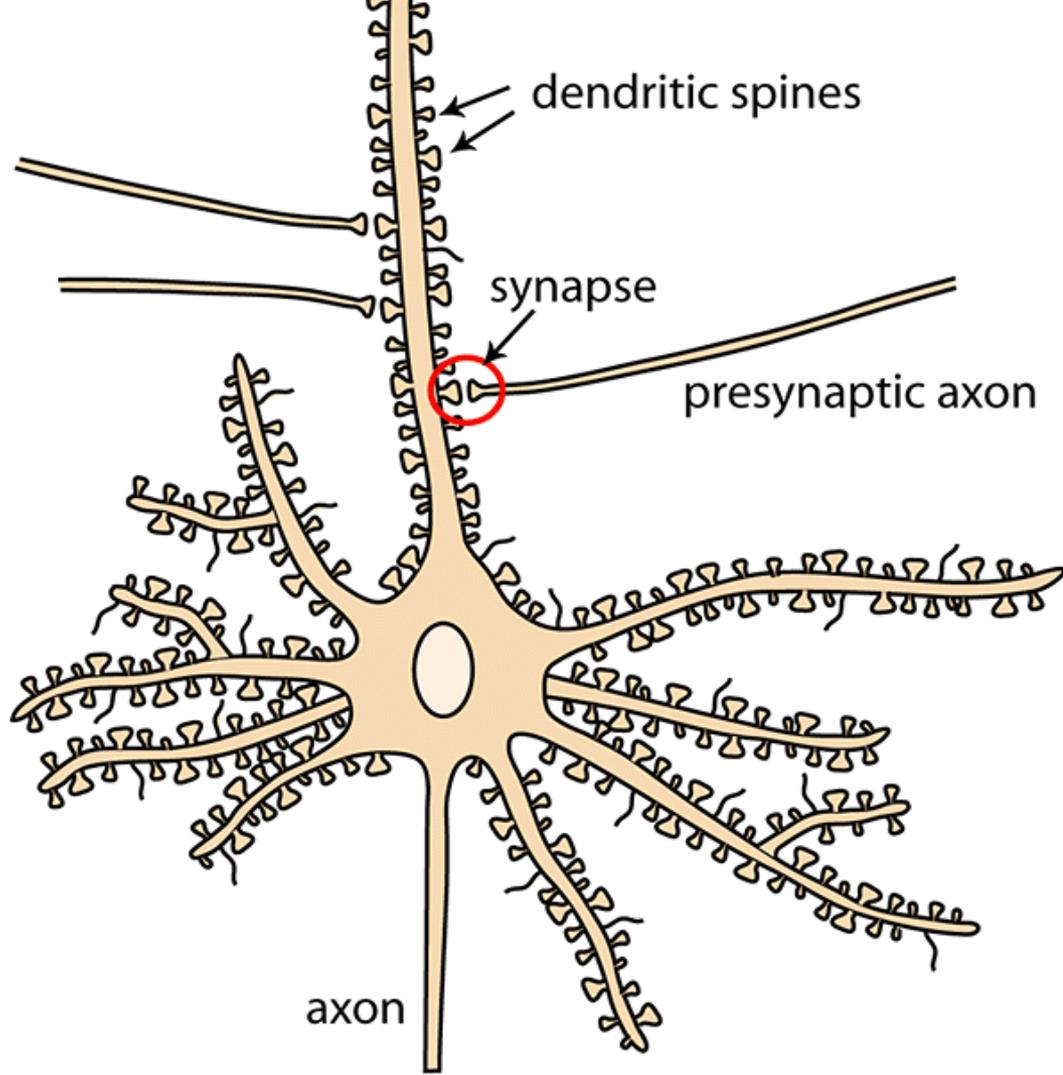
1) **Le neurone** est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles;**

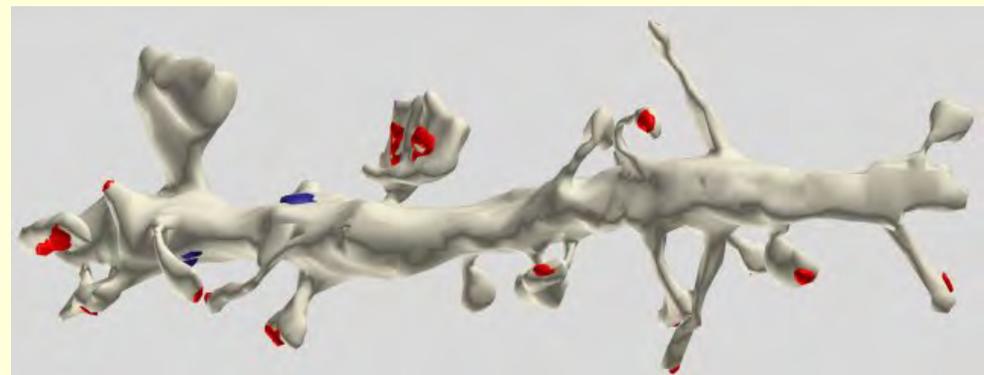
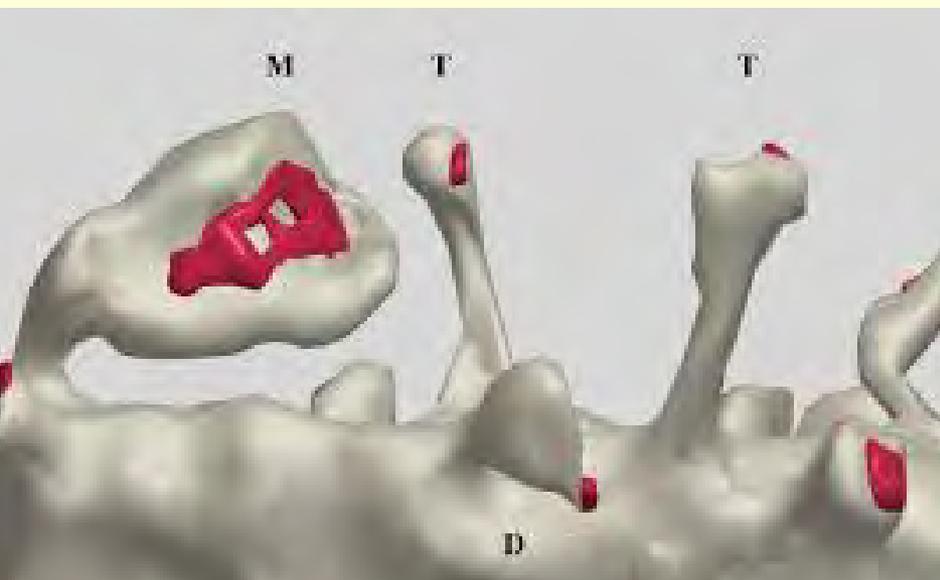
3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone;**

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).





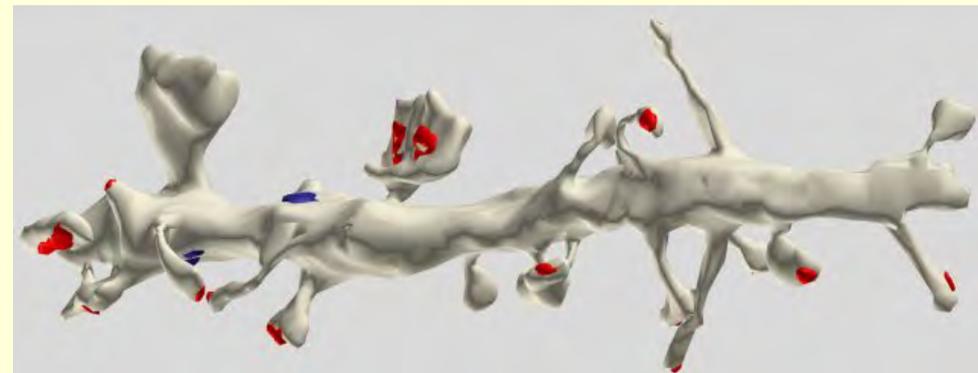
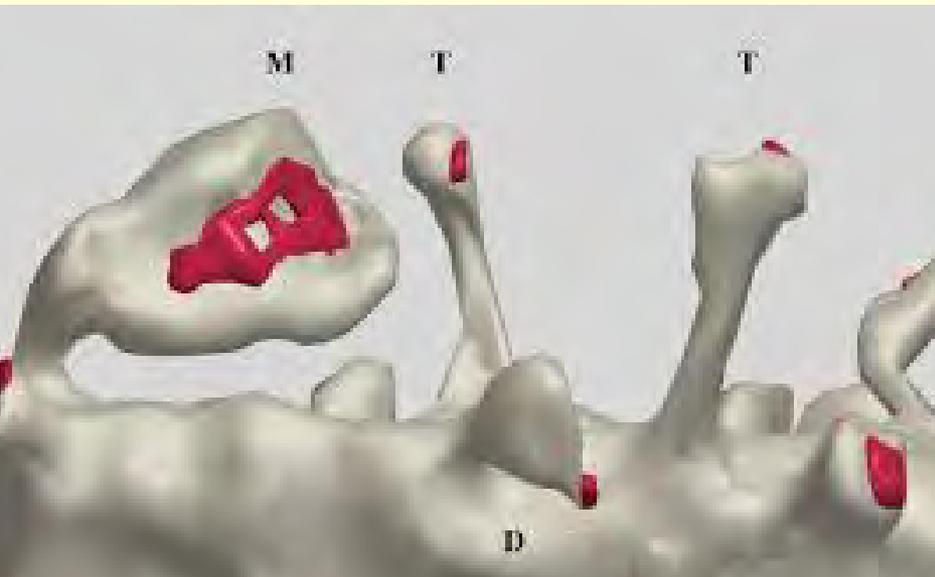
Smrt & Zhao. Frontiers in Biology 2010





De plus, la taille et la forme de ces épines dendritiques ne sont **pas fixes** mais peuvent être au contraire **très plastiques**.

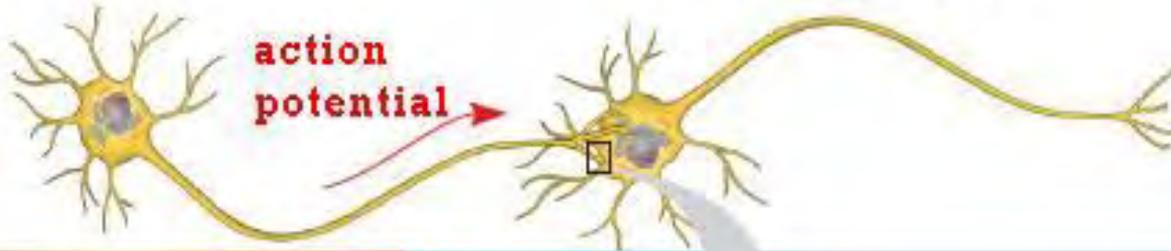
C'est cette souplesse de nos synapses qui va être à la base de **nos capacités d'apprentissage**.



Presynaptic cell

Postsynaptic cell

action potential



Synaptic vesicles containing neurotransmitter

Presynaptic membrane

Voltage-gated  $\text{Ca}^{2+}$  channel

1  $\text{Ca}^{2+}$

Synaptic cleft

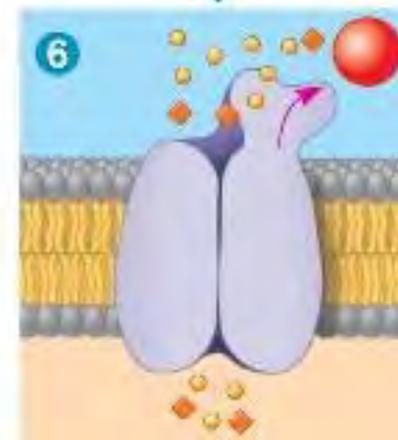
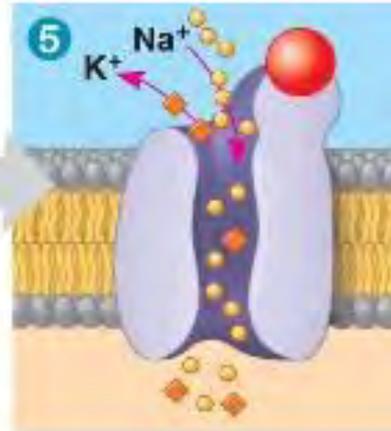
2

3

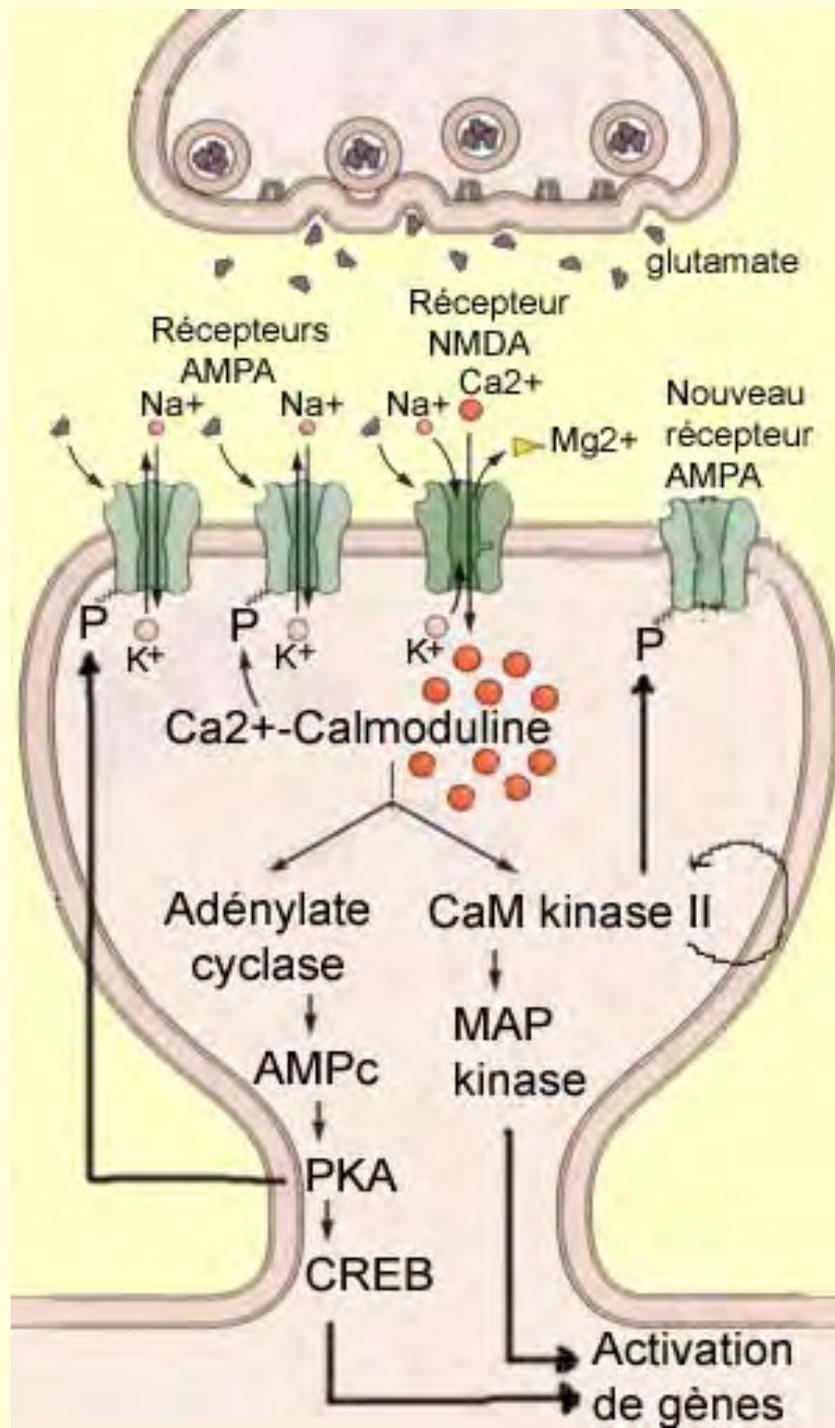
4

Ligand-gated ion channels

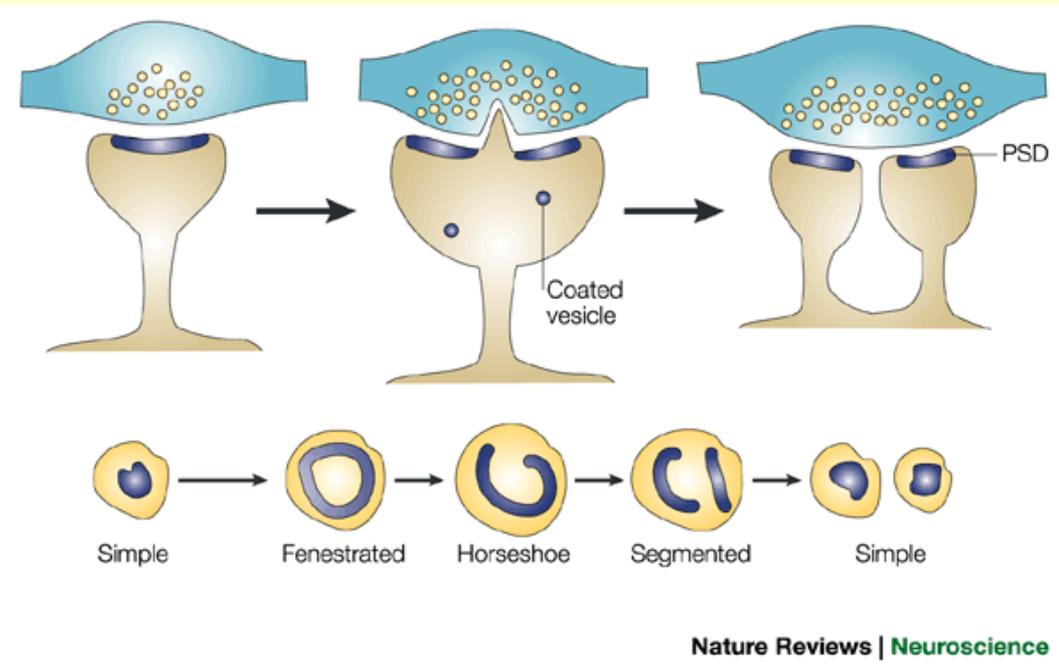
Postsynaptic membrane





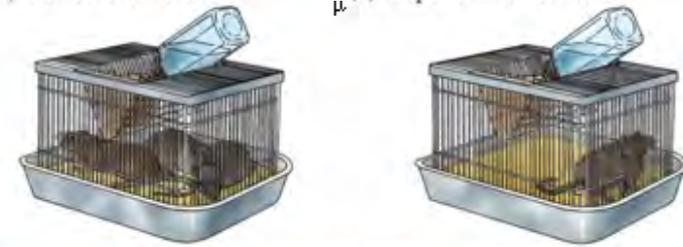


Les voies nerveuses qui servent souvent vont même pouvoir **modifier la microstructure complexe des épines dendritiques** pour que le contact synaptique entre deux neurones devienne plus intime.



a) Standard condition

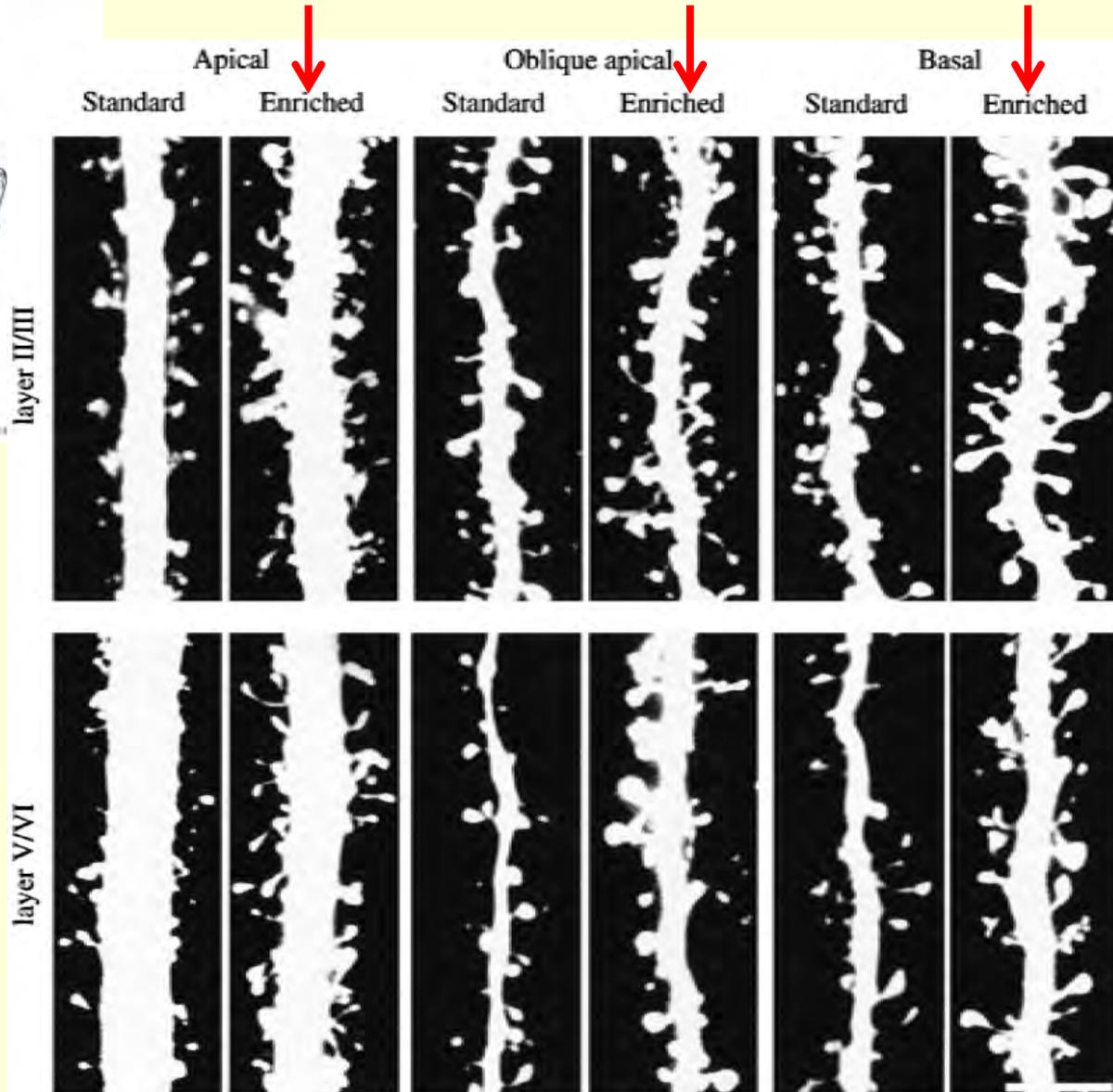
b) Impoverished condition



(c) Enriched condition

Psychology 6e, Figure 17.17

Les neurones pyramidaux du groupe venant de l'environnement enrichi ont davantage d'épines dendritiques que ceux des rats du groupe standard à la fois dans les couches II/III et V/VI.



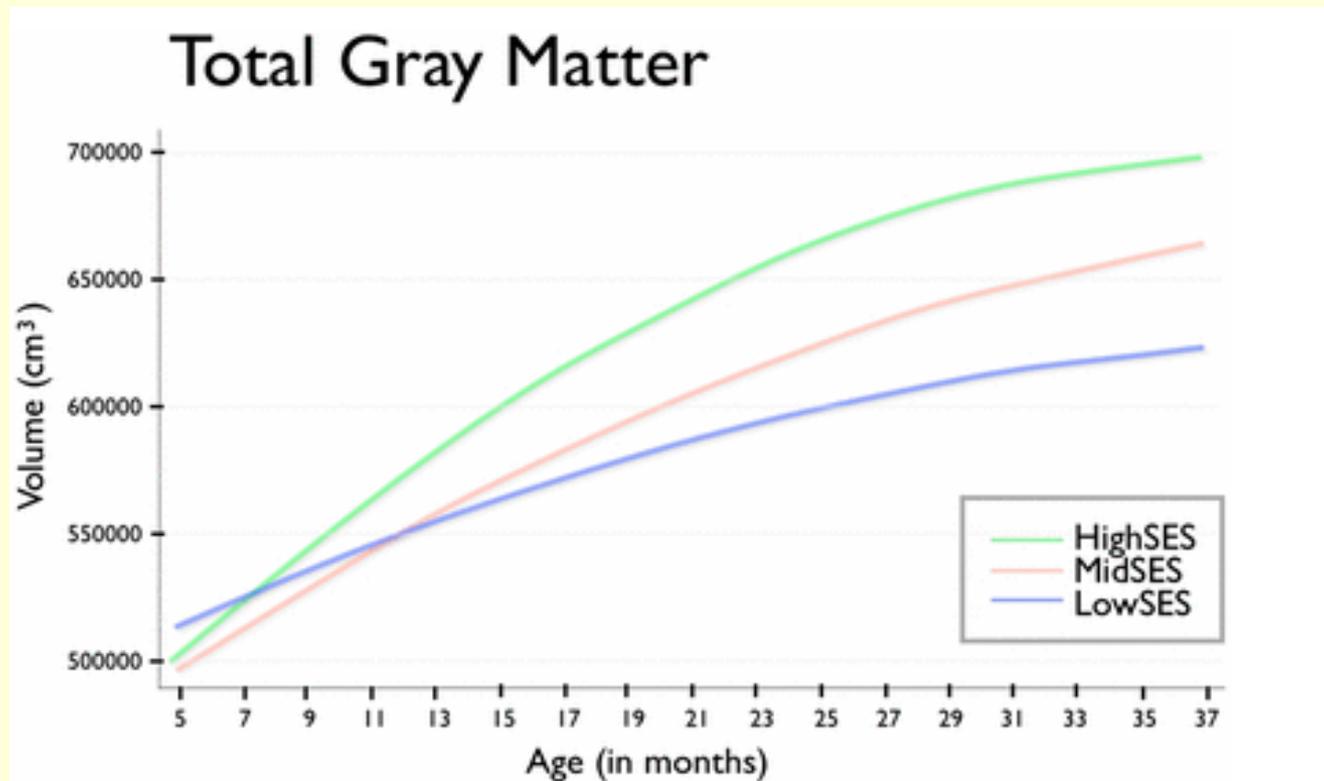
Épines dendritique de neurones du cortex somatosensoriel de rats adultes ayant grandi dans des cages **standard** ou dans un environnement **enrichi** durant 3 semaines.

Wednesday, **February 03, 2016**

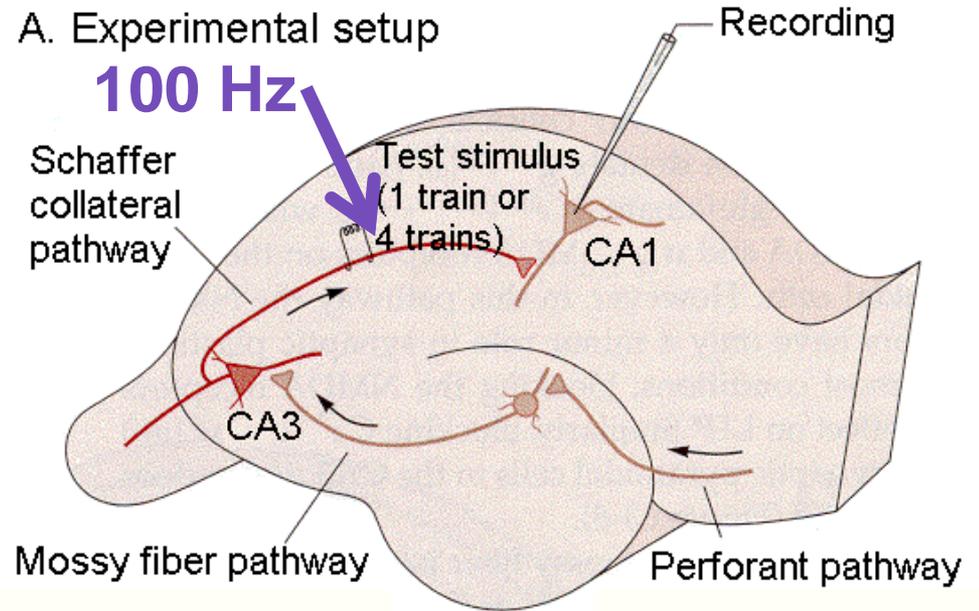
## The neuroscience of poverty.

[http://mindblog.dericbownds.net/2016/02/the-neuroscience-of-poverty.html?utm\\_source=feedburner&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29](http://mindblog.dericbownds.net/2016/02/the-neuroscience-of-poverty.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29)

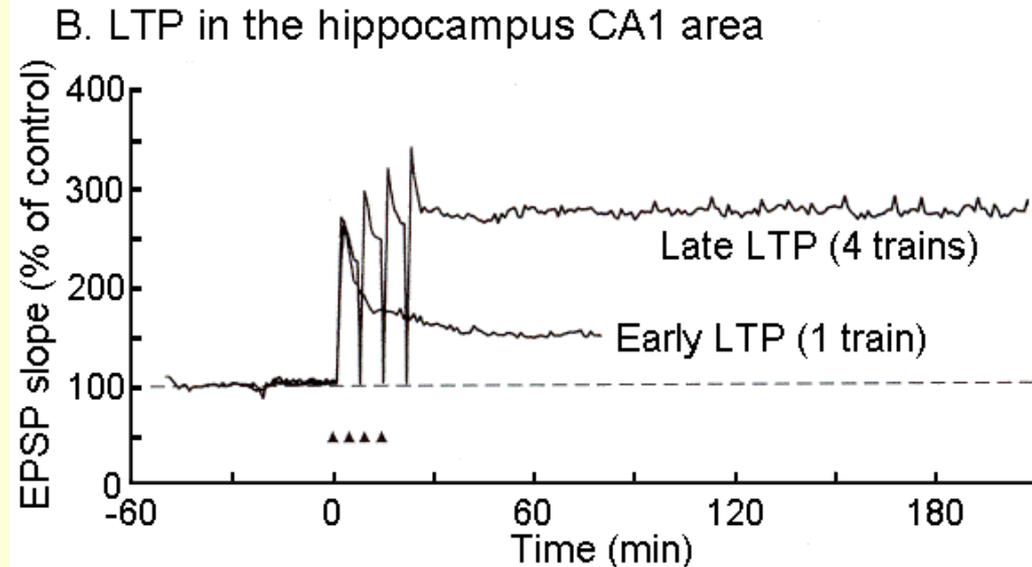
This open source review article by Alla Katsnelson is sobering, and worth a read. The major foci in the brain that appear to show disparities in poor children are the hippocampus and frontal lobe. I pass on this graphic illustrating the decline in total brain gray matter (nerve cell) volume in young children of middle and low **socioeconomic status** individuals.



On connaît plusieurs **mécanismes** pouvant expliquer cette plasticité neuronale.



Les neurones de l'hippocampe sont importants parce que c'est là où, en 1973, on a découvert un phénomène qu'on appelle la **potentialisation à long terme (PLT)**.



La PLT se produit aussi dans d'autres structures cérébrales que l'hippocampe, comme le cortex, par exemple.

La PLT n'est pas non plus le seul mécanisme cellulaire pouvant être à la base d'apprentissages.

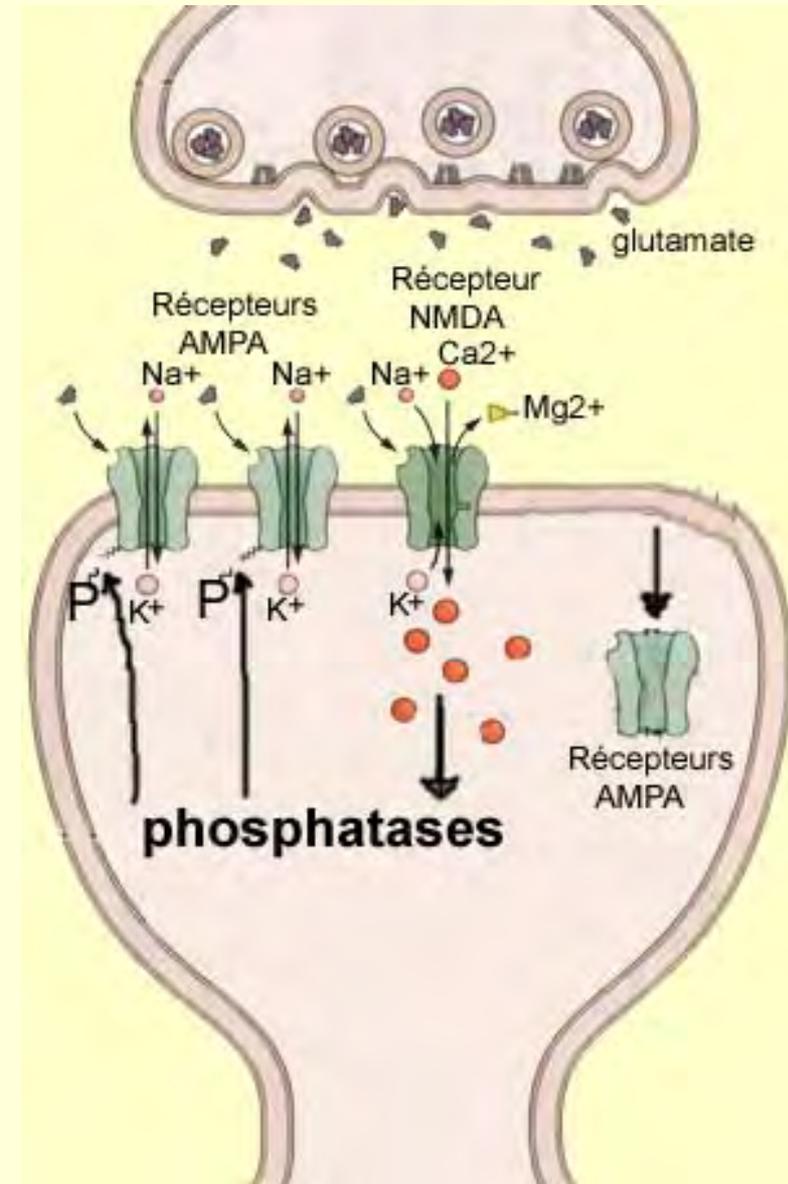
Il y a aussi la « **dépression à long terme** », ou **DLT**.

Beaucoup étudiée dans le cervelet, elle se produit aussi dans les synapses du cortex, de l'hippocampe, du striatum, etc.

À l'inverse de la PLT déclenchée par une stimulation synaptique à haute fréquence, la DLT est produite par des influx nerveux arrivant à la synapse à **basse fréquence (1 à 5 Hertz)**.

La synapse subit alors une transformation inverse à la PLT : au lieu de voir son efficacité augmentée, la connexion synaptique est affaiblie.

Dans le cas de la PLT, beaucoup de calcium rendra actif des protéines **kinases**, tandis que le peu de calcium libéré par la DLT activera plutôt des **phosphatases** (qui vont déphosphoryler les canaux AMPA).



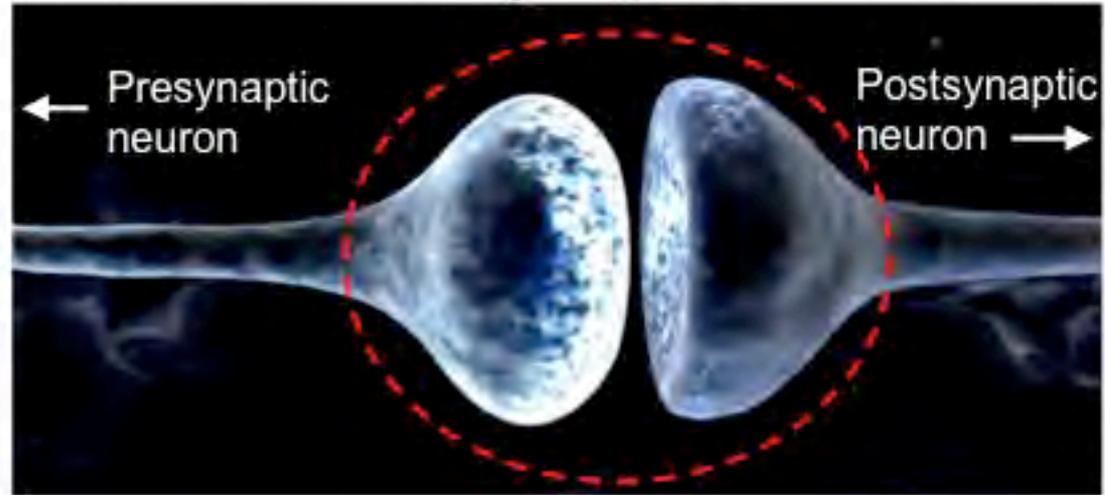
Du côté des apprentissages **associatifs** maintenant :

la **plasticité dépendante du temps d'occurrence des impulsions**  
(en anglais « Spike-timing-dependent plasticity » ou **STDP**)

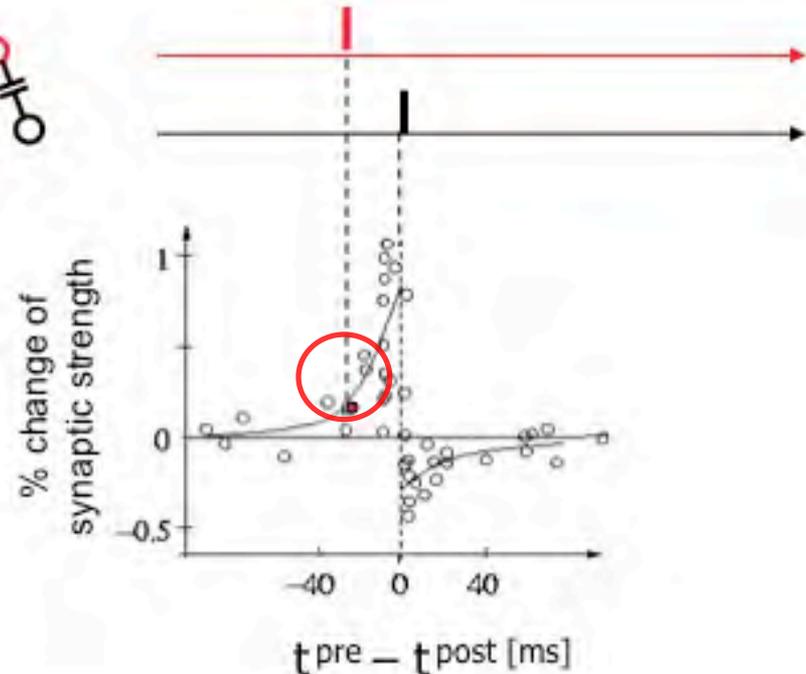
La STDP fut démontrée définitivement par **Henry Markram** alors dans le laboratoire de Bert Sakmann en 1993 avec l'article complet finalement publié en **1997**.

Si un neurone **pré-synaptique** tend, en moyenne, à faire feu tout juste **avant** que le neurone **post-synaptique** émette lui aussi un influx nerveux, alors cet input pré-synaptique va devenir **plus efficace**.

## synapse

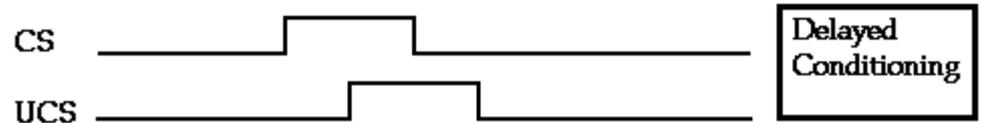


Presynaptic neuron   
Postsynaptic neuron

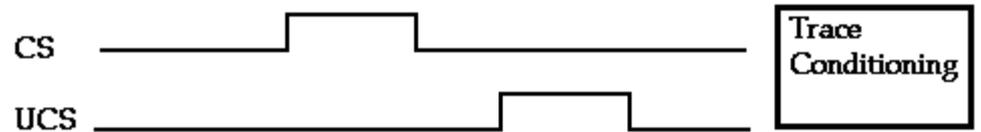


Ce renforcement au niveau synaptique fait écho au niveau cellulaire à ce que l'on observe au niveau comportemental dans le **conditionnement classique**, avec en plus la même importance fondamentale au niveau de la séquence temporelle des stimuli.

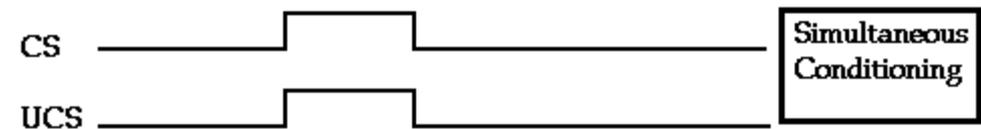
Presynaptic neuron  
Postsynaptic neuron



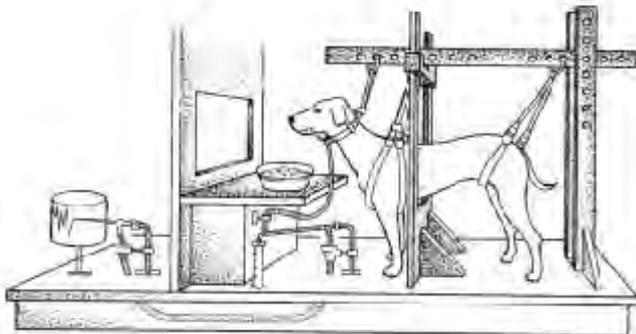
**Easily established conditioning**



**Ease of conditioning depends on length of trace**



**Very little conditioning established**

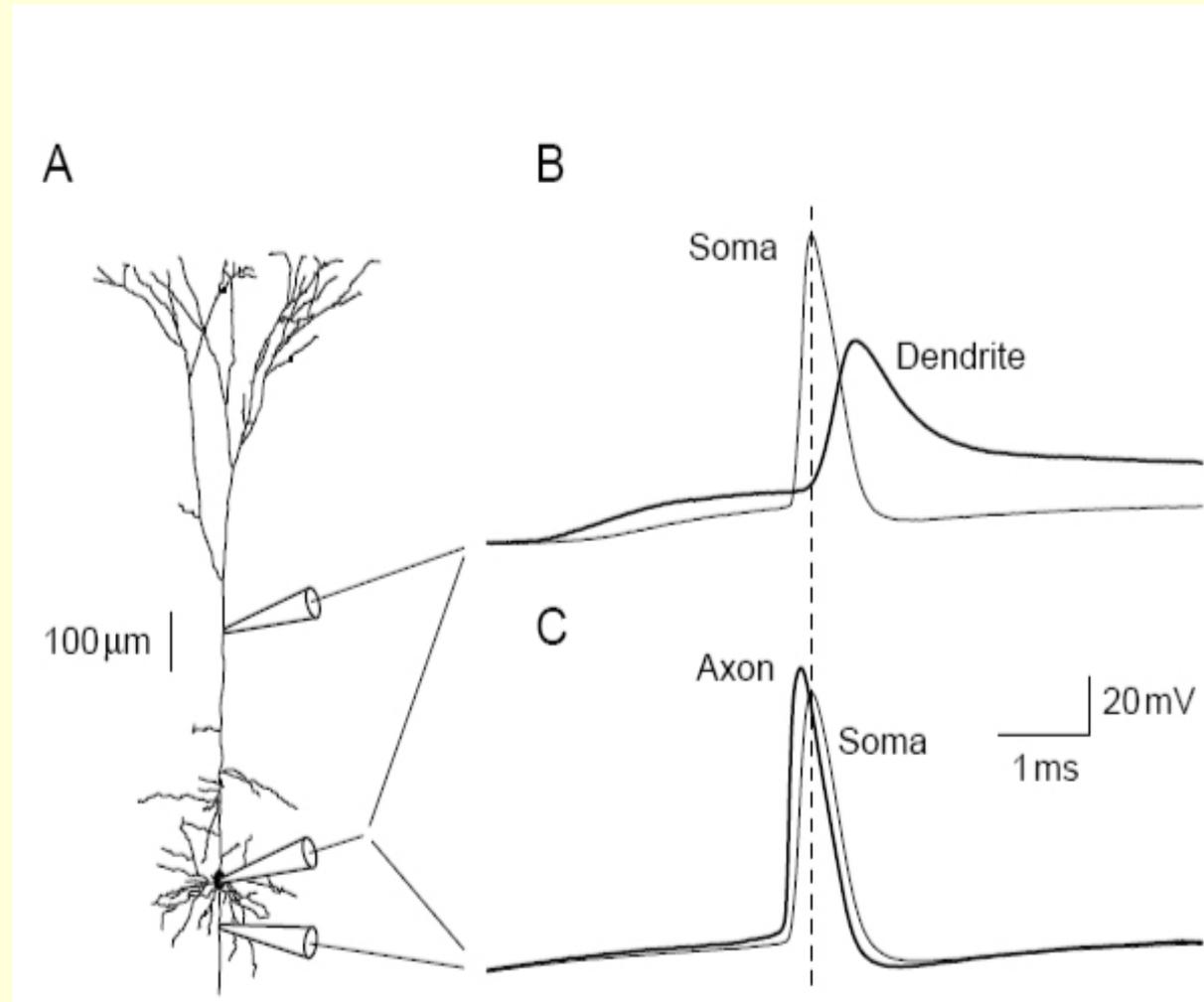


## Mécanismes probables de la STDP

Les récepteurs NMDA sont très sensibles au potentiel de membrane  
(comme on l'a vu avec la LTP).

Or le déclenchement d'un **potentiel d'action dans le neurone post-synaptique** provoque souvent également une dépolarisation dans tout le réseau dendritique de ce neurone par « **rétropropagation** » (« **neural backpropagation** », en anglais).

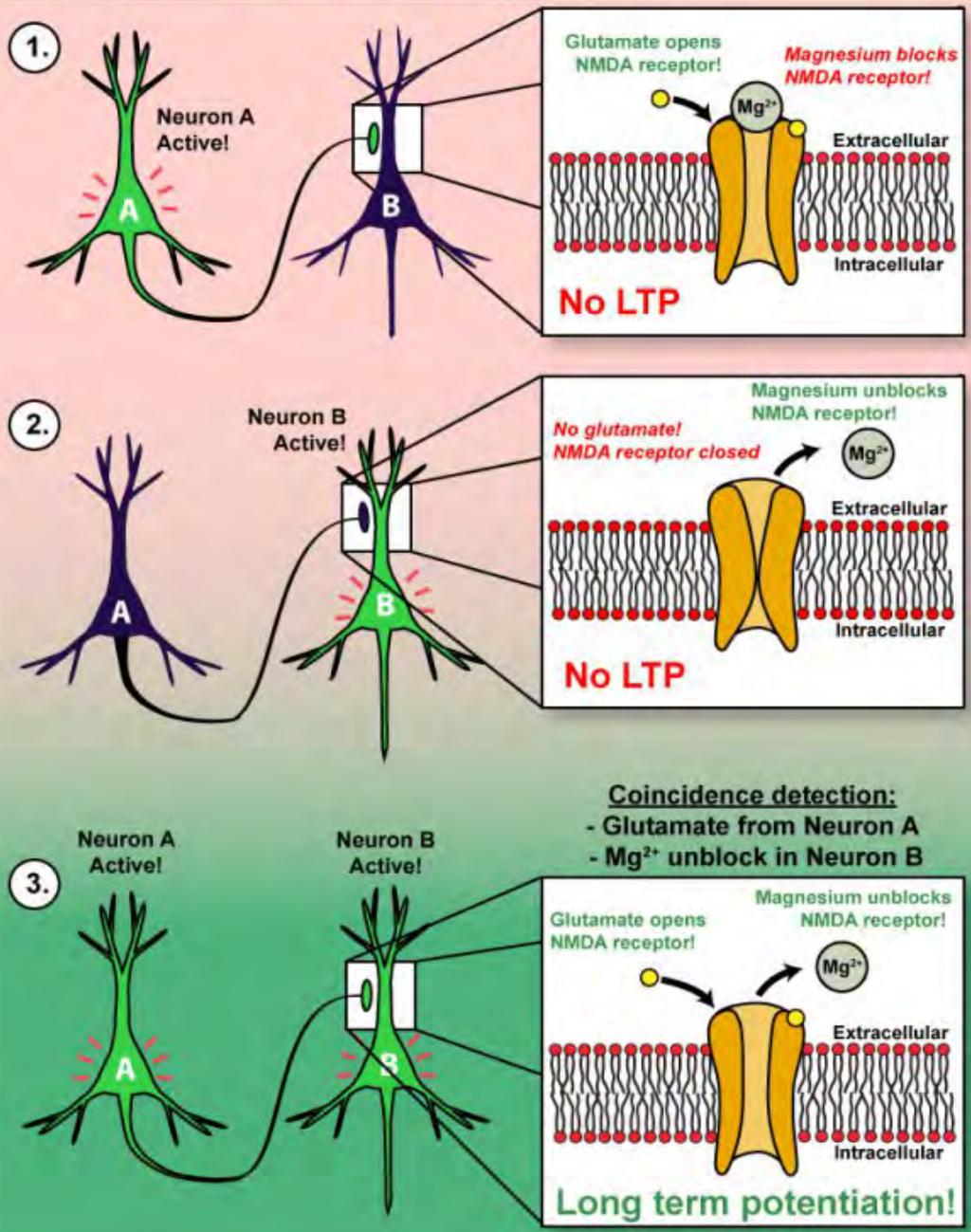
Or il semble que dans plusieurs neurones, elle se déploie spontanément dans les dendrites les plus proches du corps cellulaire **à chaque fois que le neurone fait feu**, par l'entremise de canaux calciques sensibles au voltage.





# What a Coincidence!

Magnesium, NMDA Receptors, and LTP



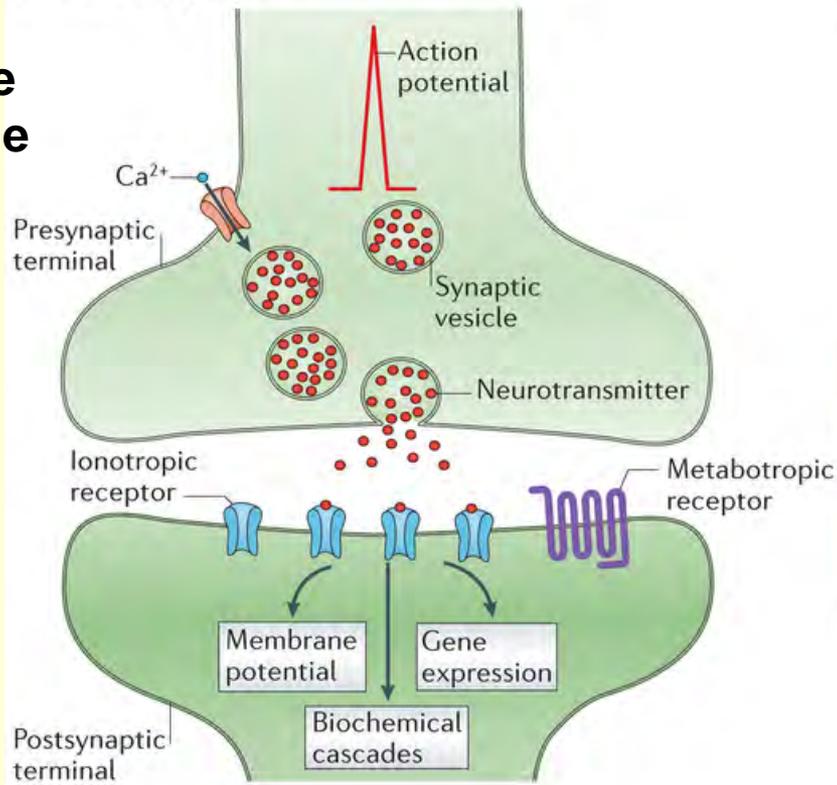
Et ce « timing » idéal pour la STDP serait quand un influx nerveux part dans le neurone post-synaptique quelques ms après celui du neurone pré-synaptique.

On continue de découvrir des mécanismes et des lieux de **plasticité** où l'on n'en attendait pas...

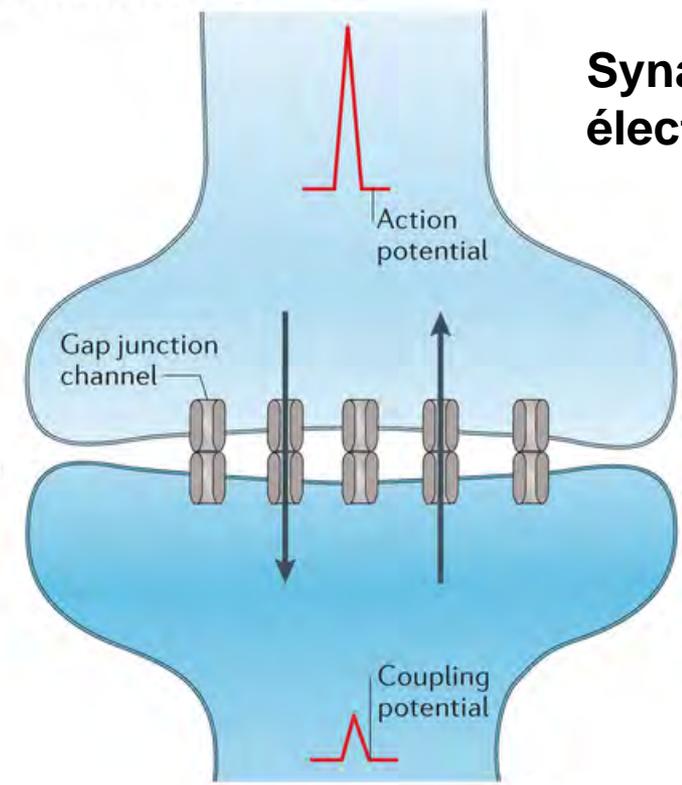
Juste deux exemples...

# Synapse chimique

a Chemical synapse

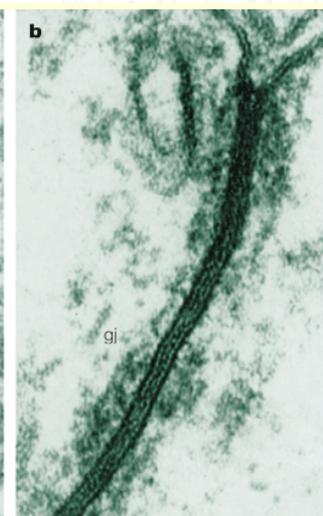
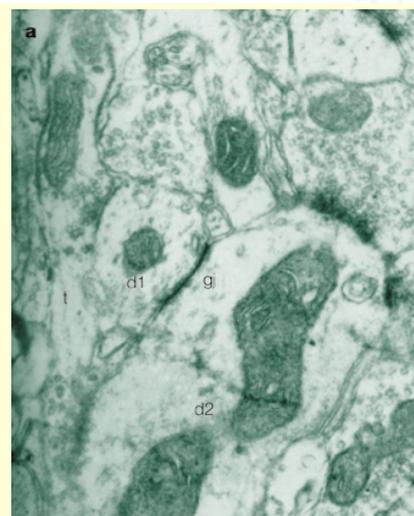


b Electrical synapse



# Synapse électrique

Nature Reviews | Neuroscience



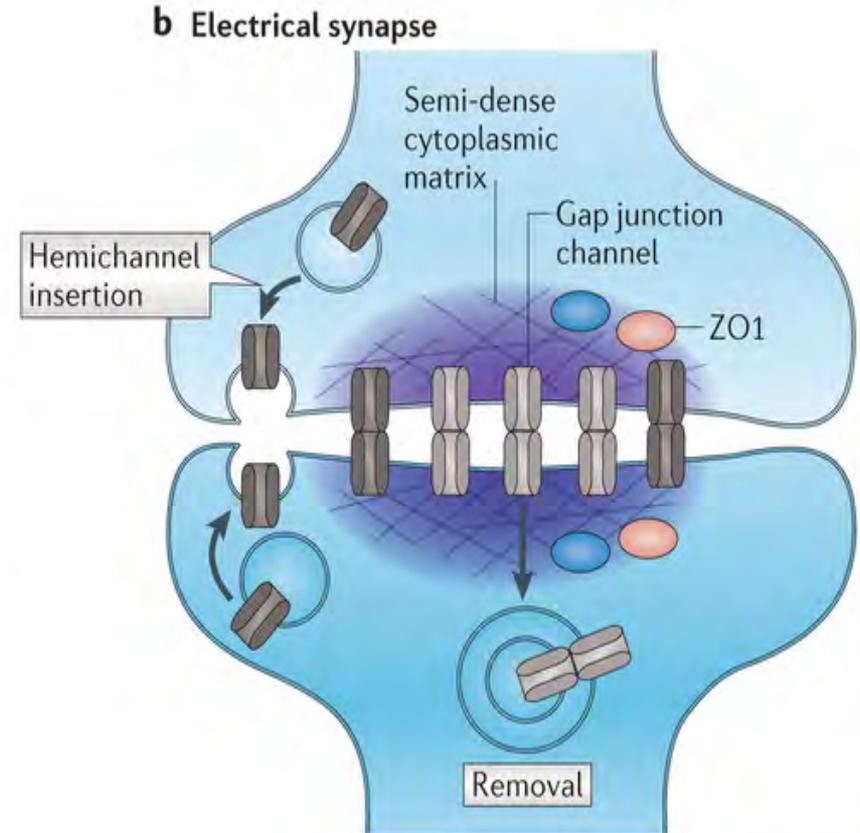
## Le “coming out” de la synapse électrique

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/05/05/le-coming-out-de-la-synapse-electrique/>

Les synapses électriques sont beaucoup **plus répandues** que ce que l'on croyait dans le cerveau humain;

la synapse électrique atteindrait des niveaux de **complexité** et de **plasticité** tout à fait comparable à la synapse chimique;

les synapses chimiques et électriques **interagiraient énormément**;



Nature Reviews | Neuroscience

## Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses

Alberto E. Pereda

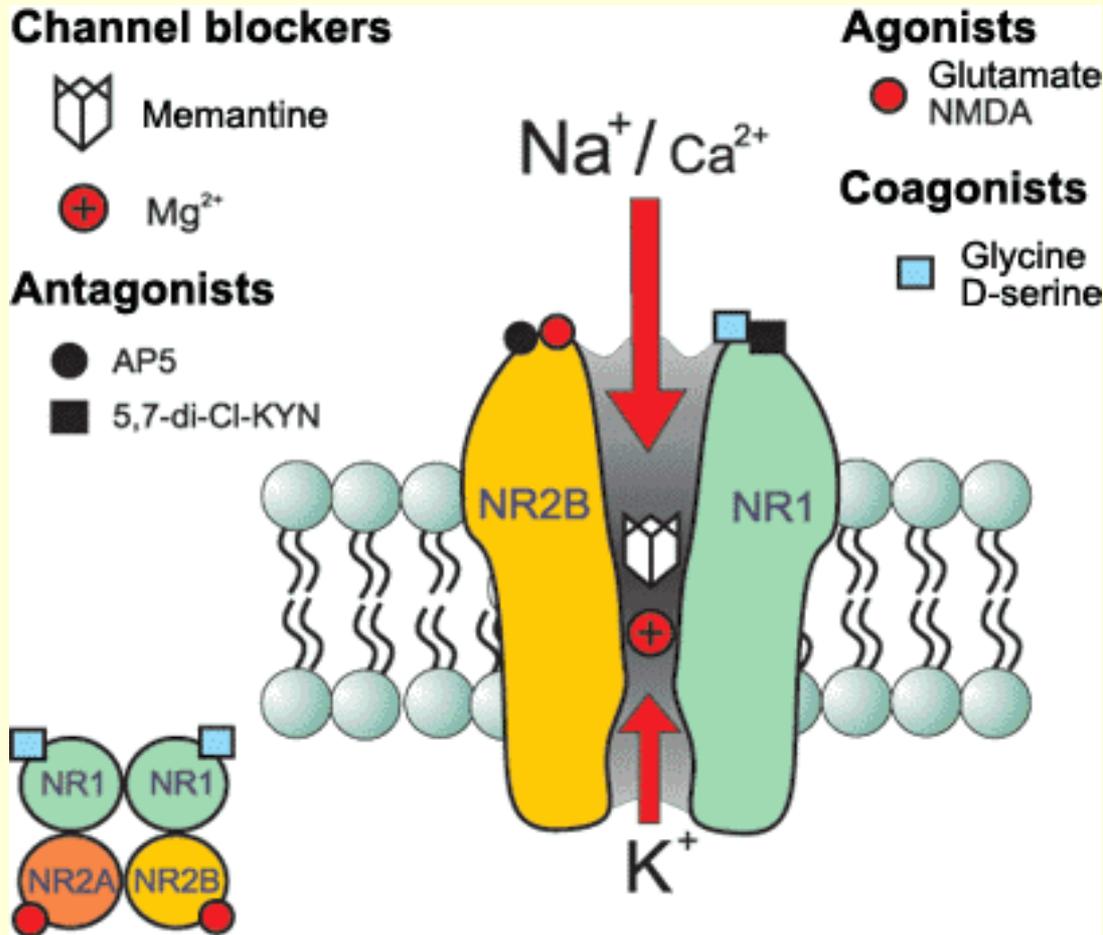
Nature Reviews Neuroscience 15, 250–263 (2014)

<http://www.nature.com/nrn/journal/v15/n4/full/nrn3708.html>

Autre découverte étonnante de plasticité du côté du récepteur NMDA du glutamate...

**Le récepteur NMDA** a plusieurs caractéristiques uniques :

- Il est normalement **bloqué par un atome de magnésium** qui doit être enlevé pour que le canal s'ouvre;
- L'ouverture du canal NMDA est donc **à la fois** influencé par un **neurotransmetteur** et la **différence de voltage** entre l'intérieur du neurone et l'extérieur.
- Avec l'ouverture du canal, la **quantité de calcium** qui va pénétrer dans le neurone va être déterminante pour la **plasticité** de la synapse;



Récepteur NMDA au glutamate

# NMDA receptor subunit diversity: impact on receptor properties, synaptic plasticity and disease

Pierre Paoletti, Camilla Bellone & Qiang Zhou

Nature Reviews Neuroscience 14, 383–400 (2013)

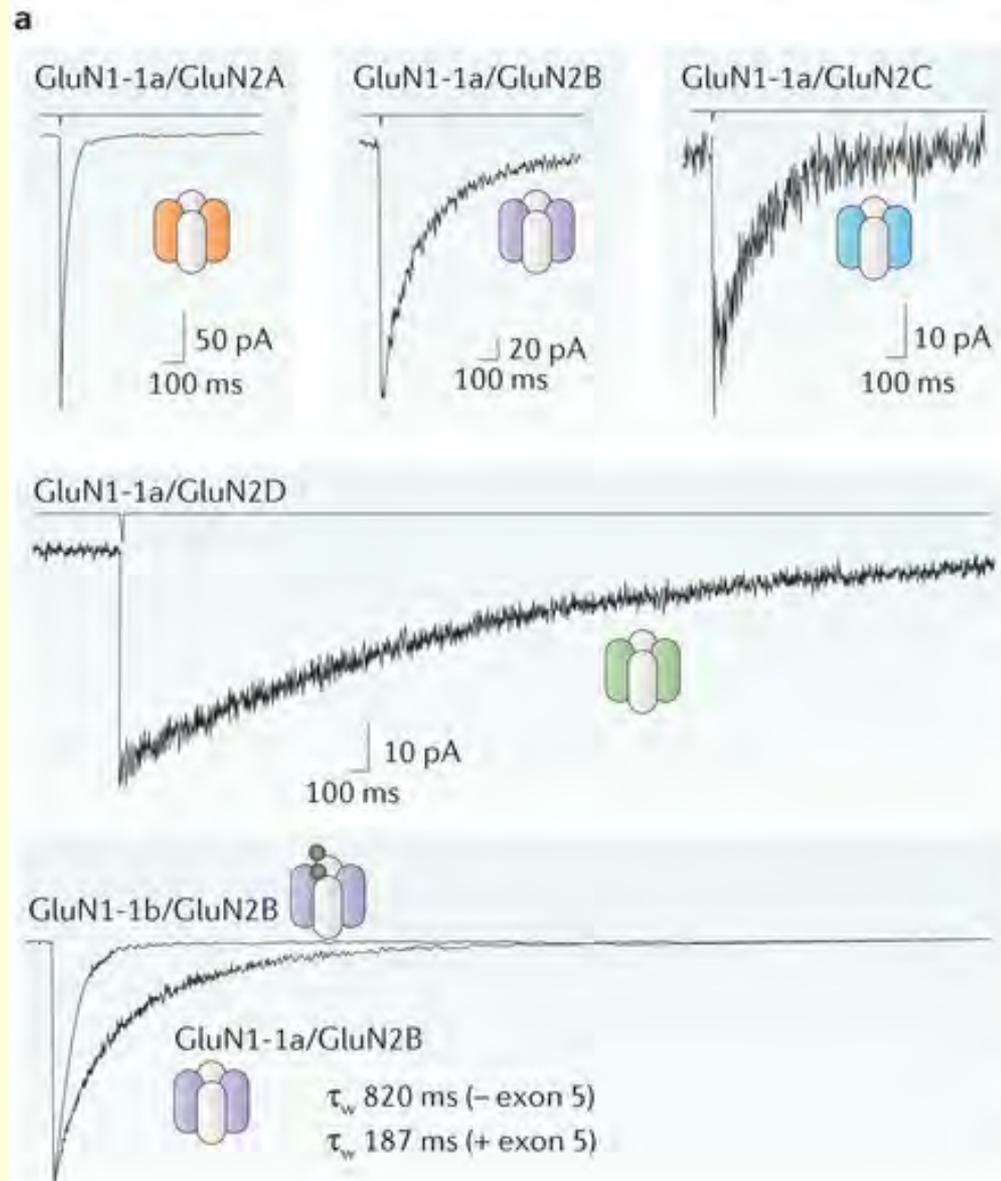
<http://www.nature.com/nrn/journal/v14/n6/full/nrn3504.html>

On savait que les récepteur NMDA forment des **complexes de 4 sous-unités homologues**.

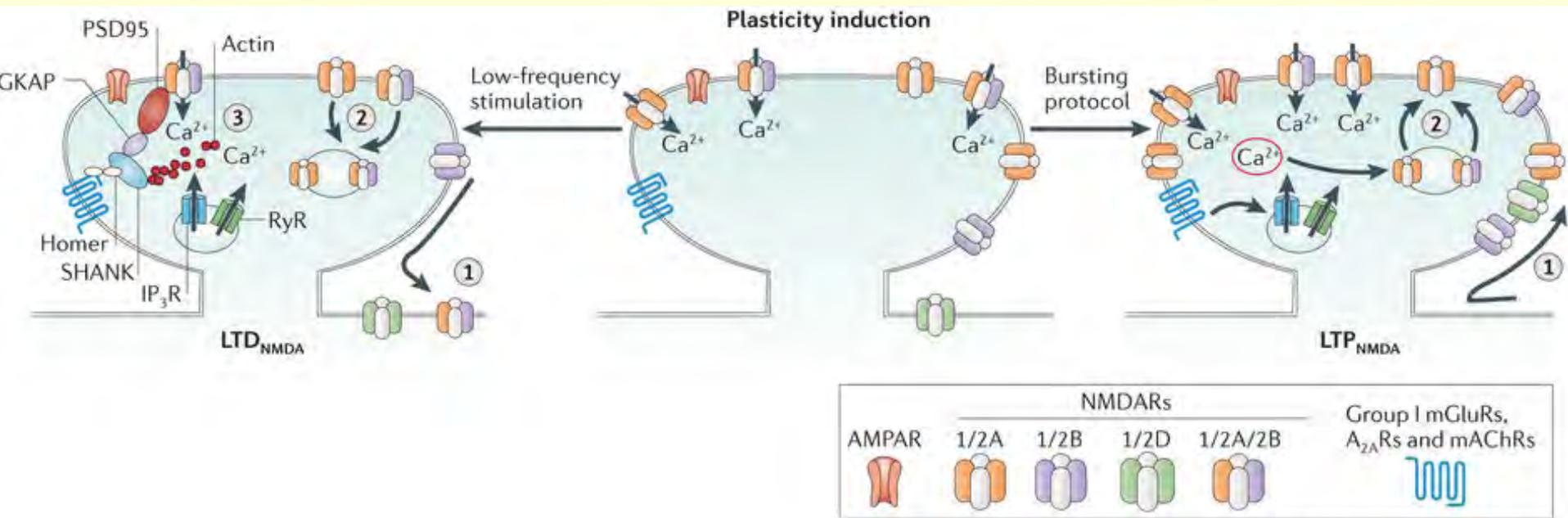
Ce que cet article va montrer, c'est que **la composition** du récepteur NMDA est elle-même **plastique** à cause de la combinatoire de différentes sous-unités, ce qui donne lieu à un grand **nombre de sous-types de récepteurs possibles**.



Selon les sous-unités, différentes **propriétés biophysiques** du récepteur (par exemple la durée d'ouverture suite à la fixation du glutamate).

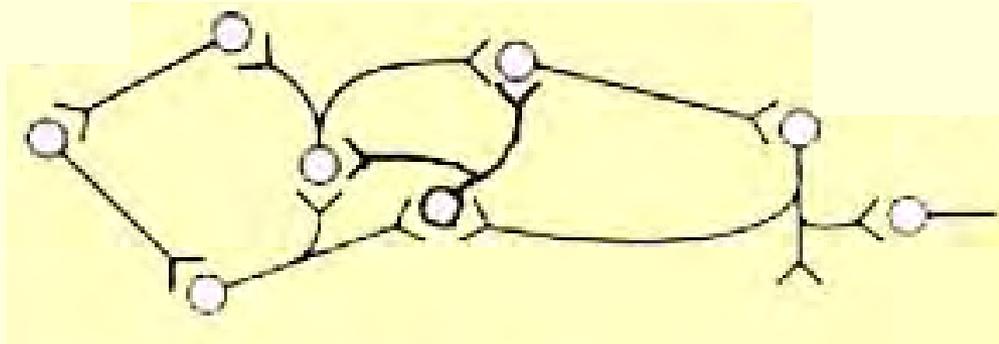


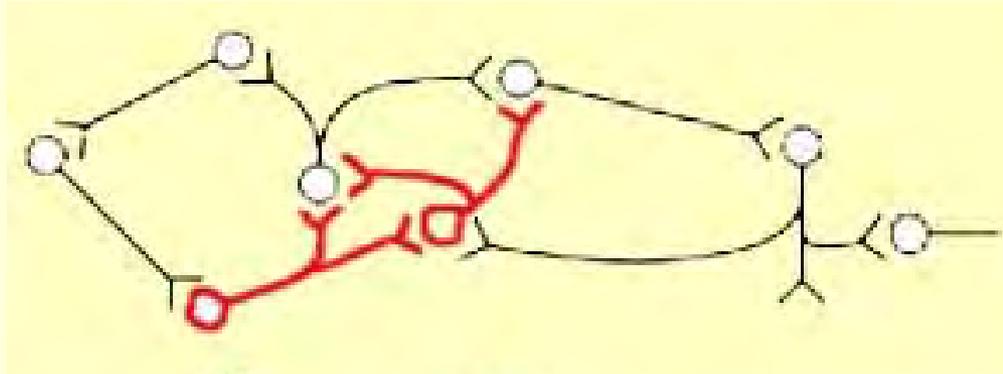
Ce qu'on est en train de découvrir, c'est une **nouvelle forme de plasticité** où les sous-unités semblent mobiles et capables d'être échangées d'un récepteur à l'autre !



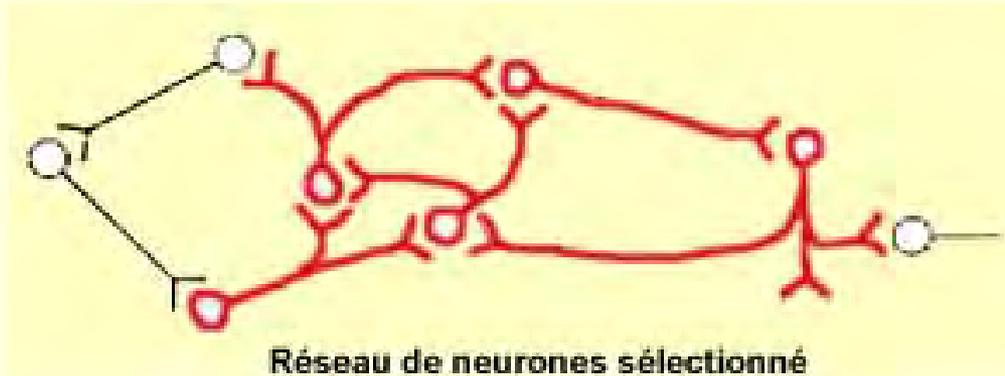
La cellule semble savoir comment ajuster la structure de ses propres composantes moléculaire en fonction de l'activité dans un circuits beaucoup plus large...

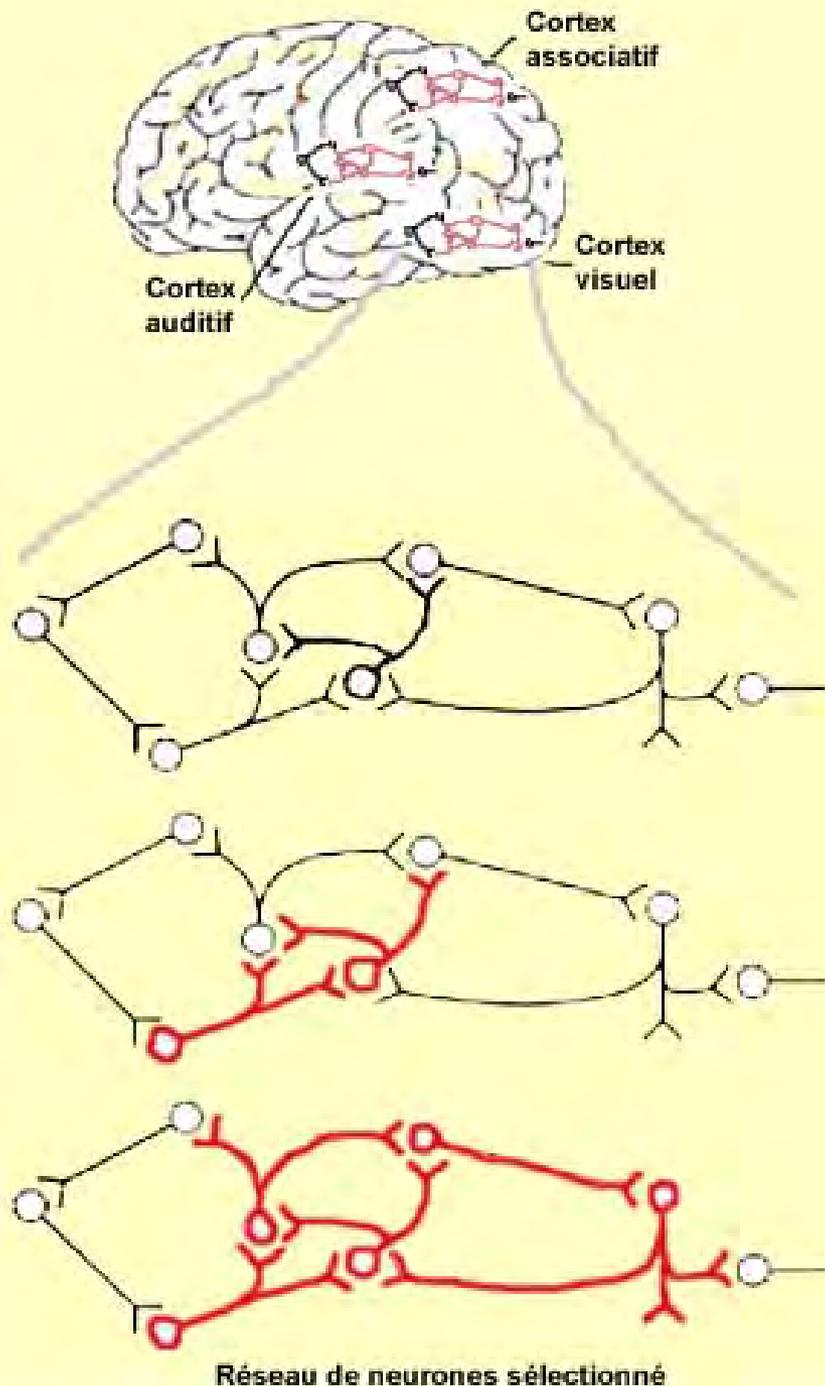
Il est temps de remonter un peu  
les niveaux d'organisation...





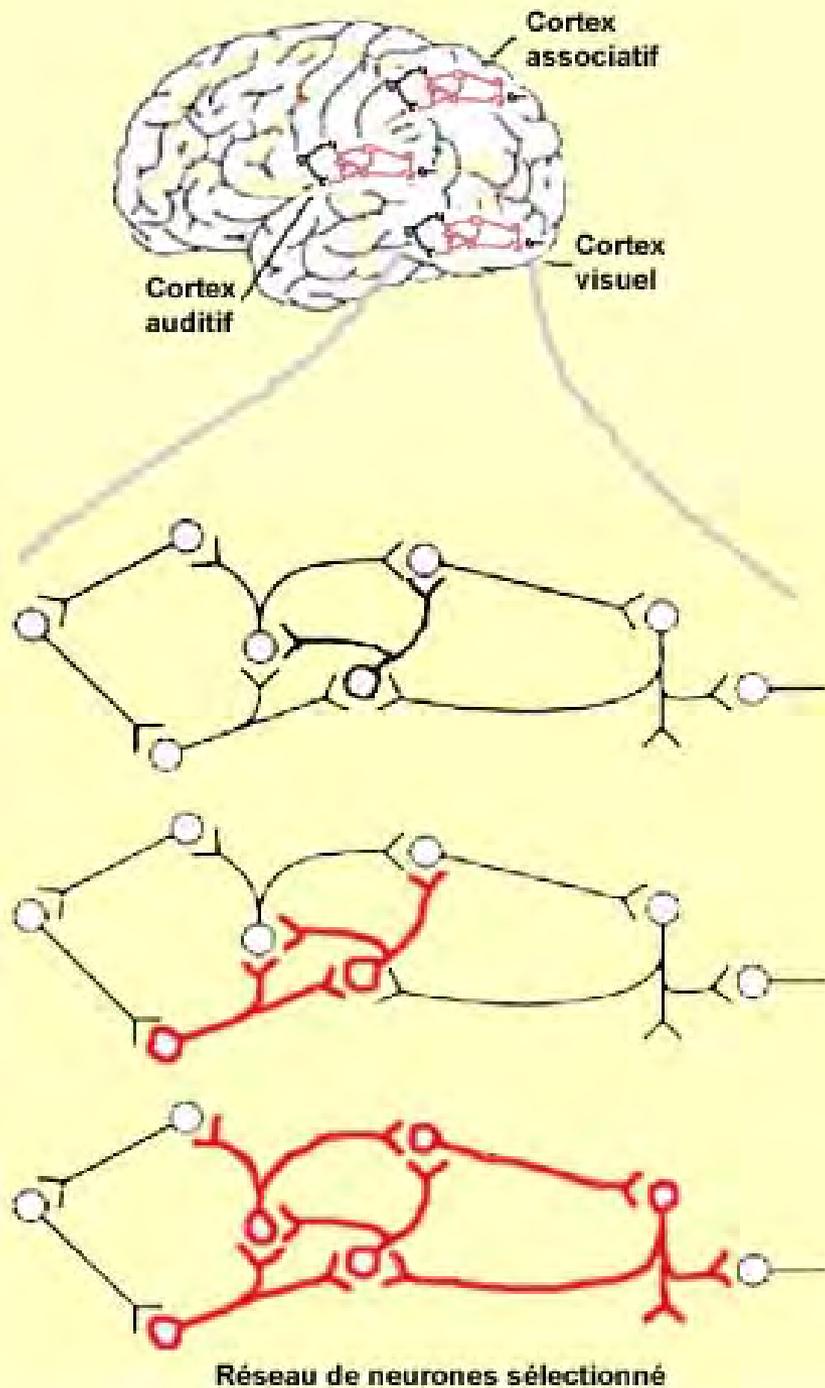
# Assemblées de neurones





On renforce des connexions pour former des groupes de neurones qui vont devenir **habitués** à travailler ensemble.

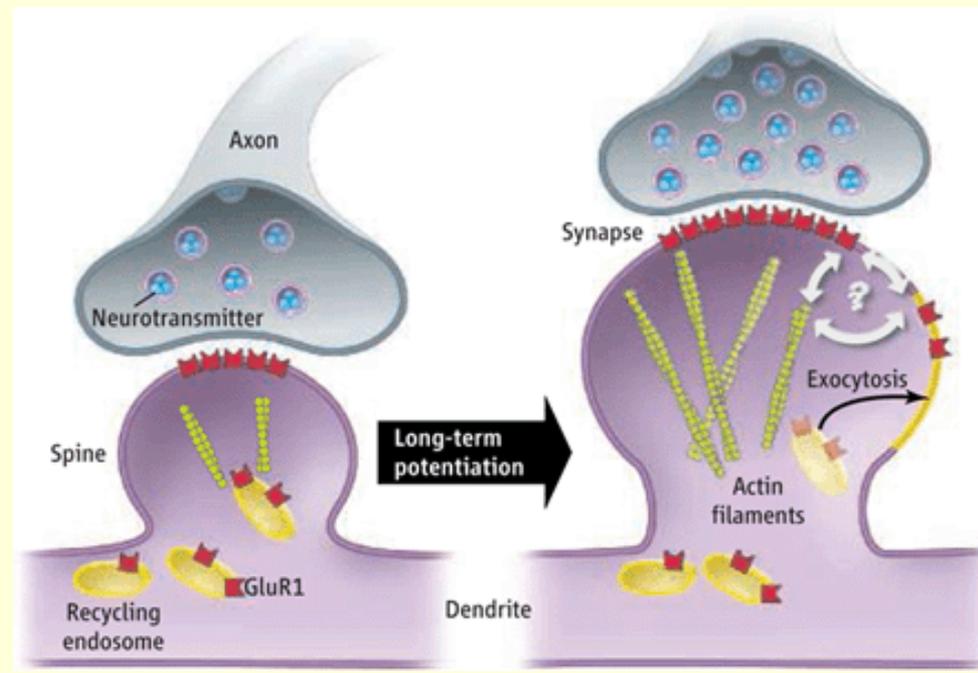
**C'est la base de notre mémoire.**



Comment ?

grâce à ces  
**différents mécanismes**

permettant de faire varier  
l'efficacité synaptique.



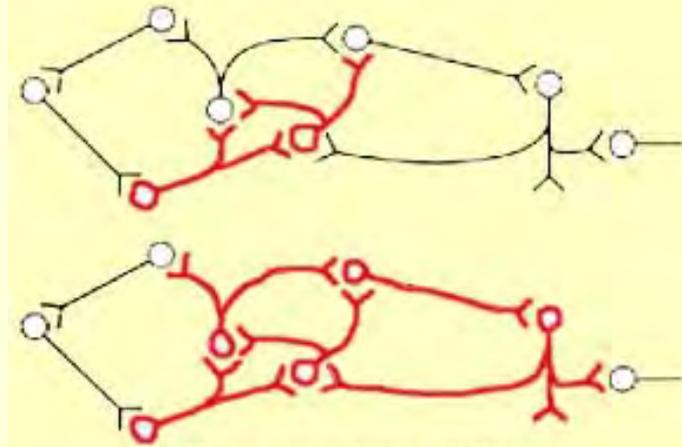


## Neuromythe à oublier



Notre cerveau n'étant jamais exactement le même jour après jour...

La mémoire humaine est forcément une **reconstruction**.



Réseau de neurones sélectionné



## Analogie intéressante

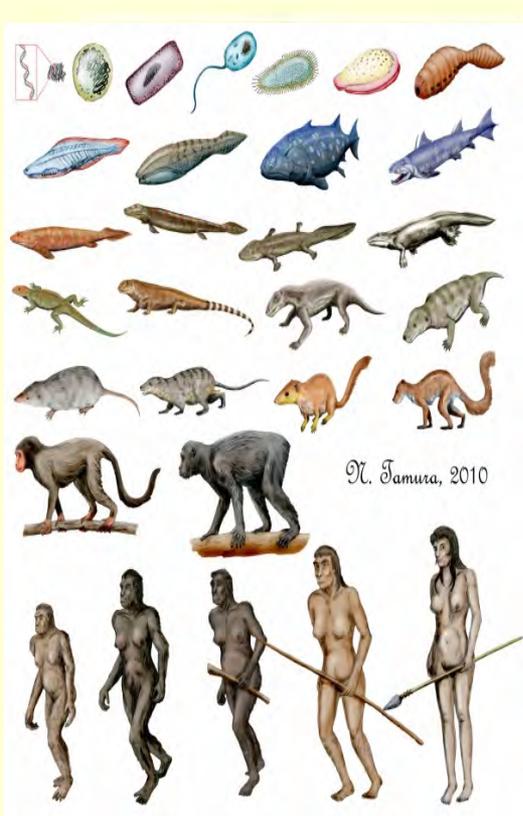


par **Jean-Claude Ameisen**  
le samedi de 11h05 à 12h

**sur les épaules de Darwin**  
**«Vivre ensemble»**



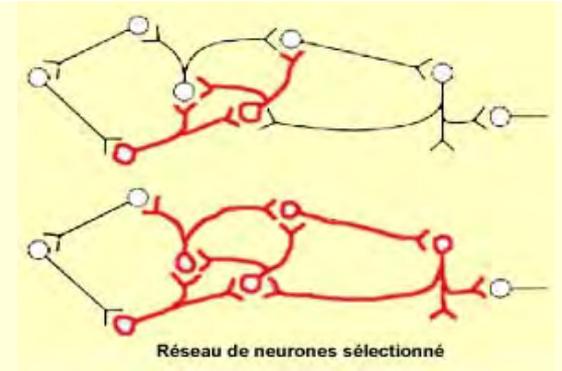
Podcast



Plans généraux  
du système nerveux  
provenant de nos gènes



## Analogie intéressante



les **traces** qui se sont accumulées durant l'évolution (les mutations dans l'ADN) ont fait **diverger** les espèces;

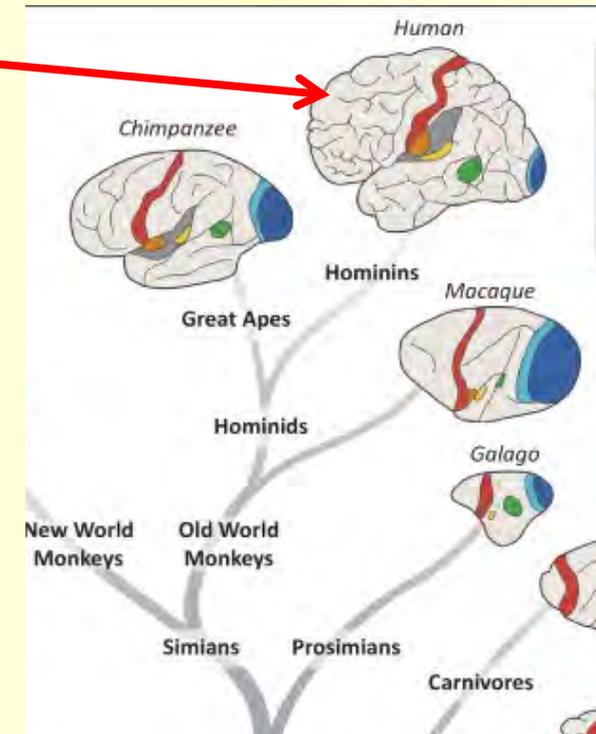
les **traces** que laissent les expériences de notre vie dans notre système nerveux (circuits de neurones renforcés) nous font **diverger** de qui l'on était auparavant.

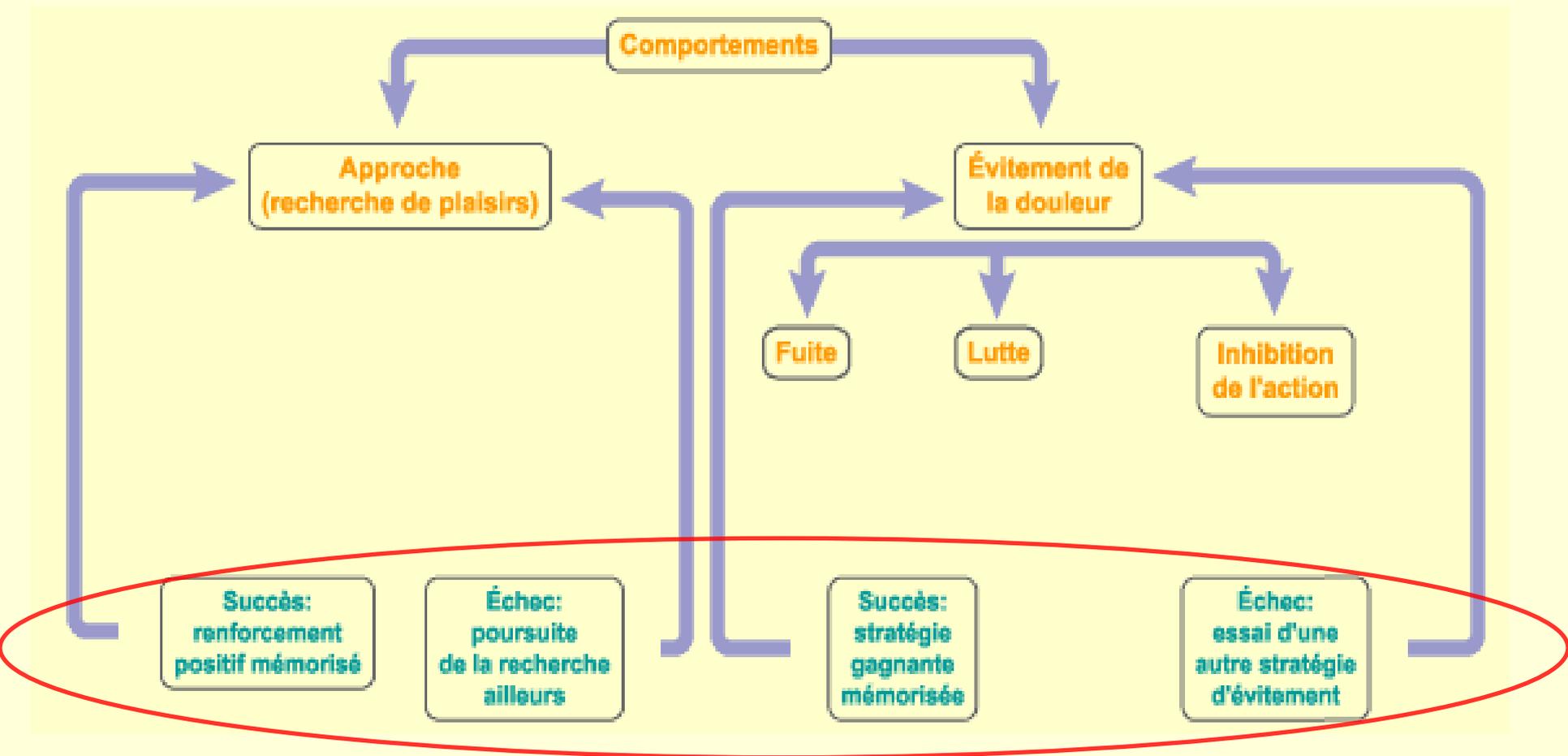
# Que faisons-nous...

...avec cette boucle sensori-motrice ,

modulée par de plus en plus  
« d'interneurones »,

quand quelque chose attire notre attention  
dans notre environnement ?





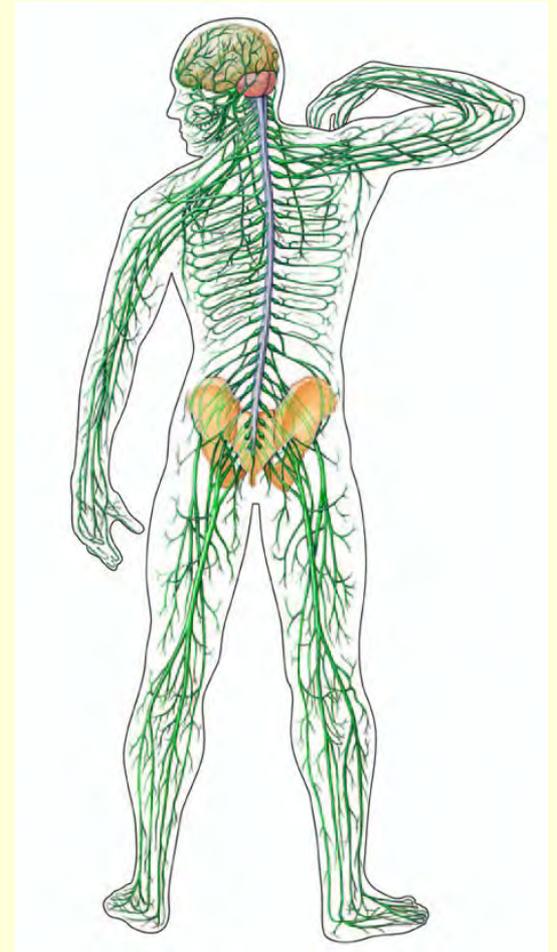
# Apprentissage et mémoire

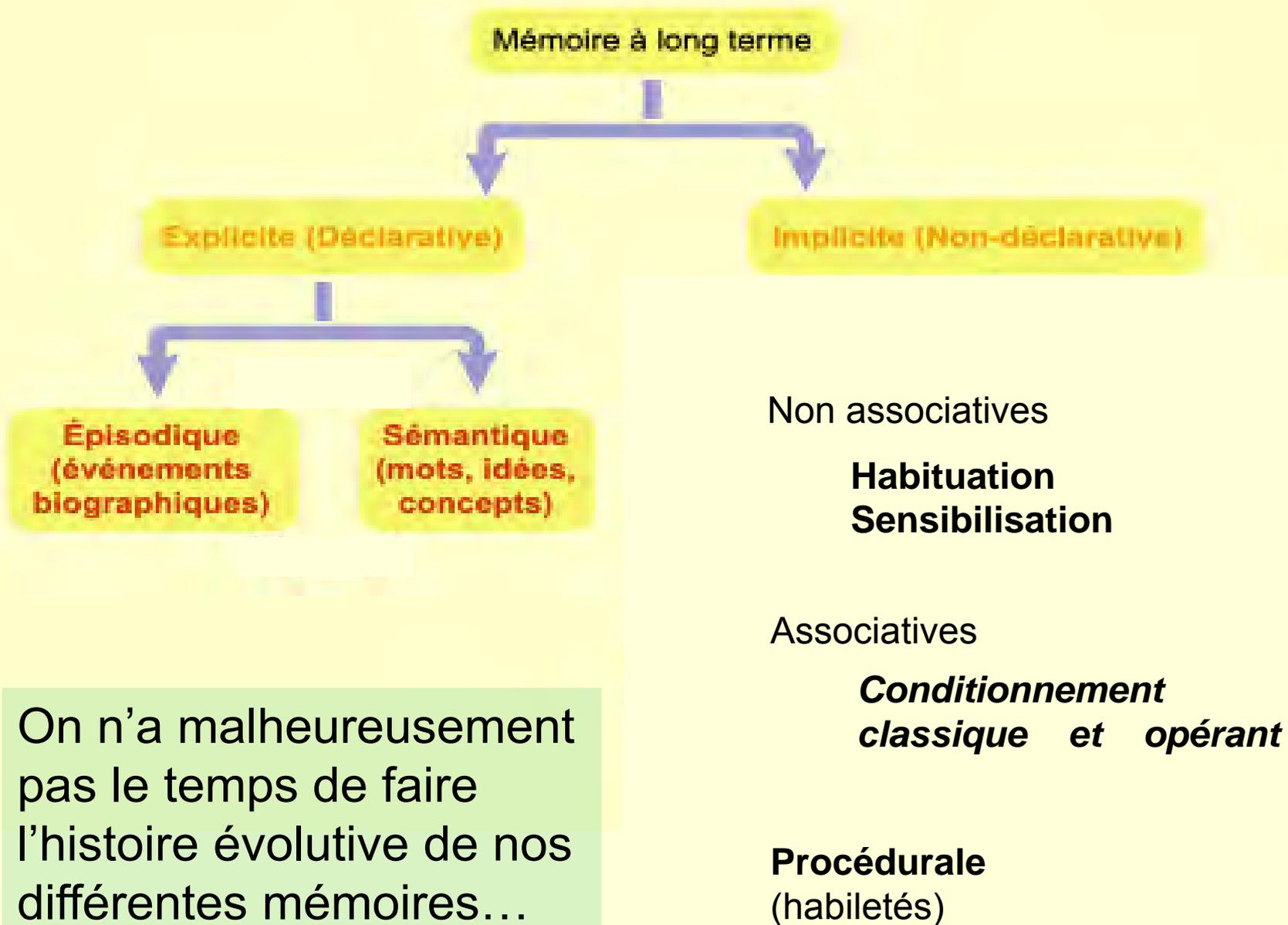
« La mémoire du passé n'est pas faite pour se souvenir du passé, elle est faite pour prévenir le futur.

La mémoire est un instrument de **prédiction**. »

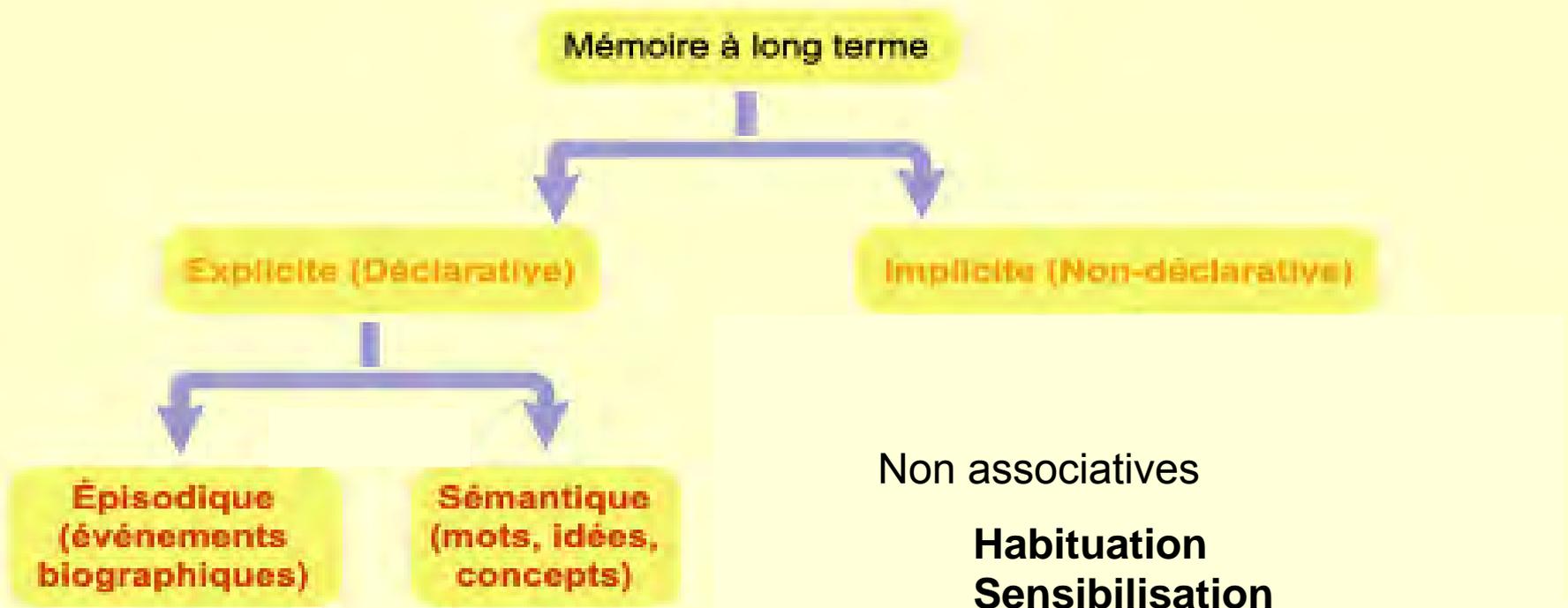
- Alain Berthoz

Encore une fois,  
une perspective évolutive  
sera très éclairante...





On n'a malheureusement pas le temps de faire l'histoire évolutive de nos différentes mémoires...



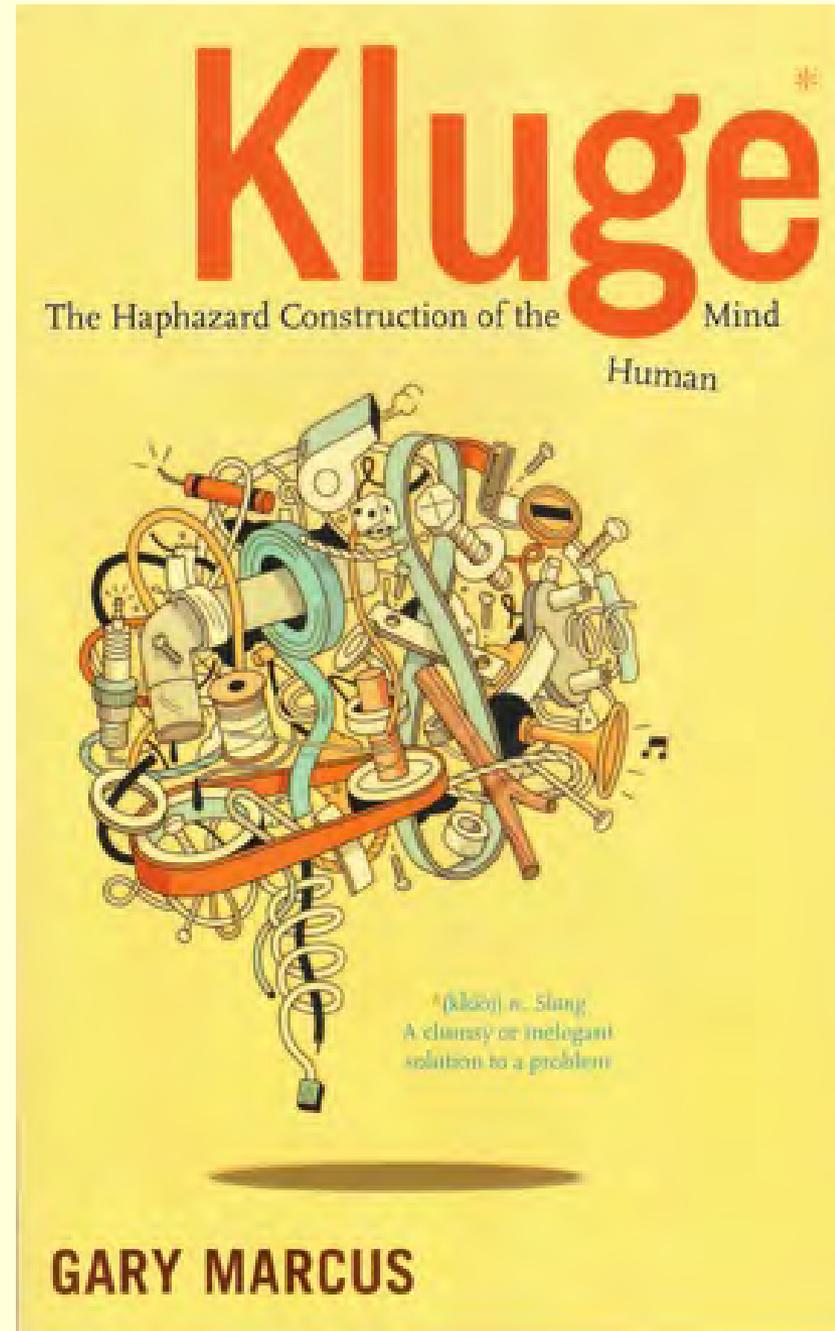
Disons simplement que dans le cerveau humain de multiples systèmes de mémoire cohabitent

et mettent en jeu différentes structures cérébrales apparues progressivement au cours de l'évolution.



Disons simplement que dans le cerveau humain de multiples systèmes de mémoire cohabitent

et mettent en jeu différentes structures cérébrales apparues progressivement au cours de l'évolution.



# Mémoire à long terme

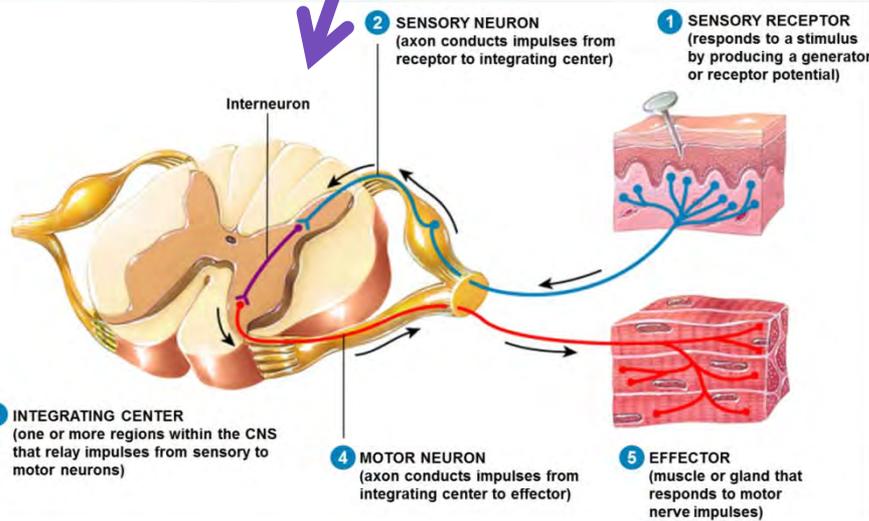
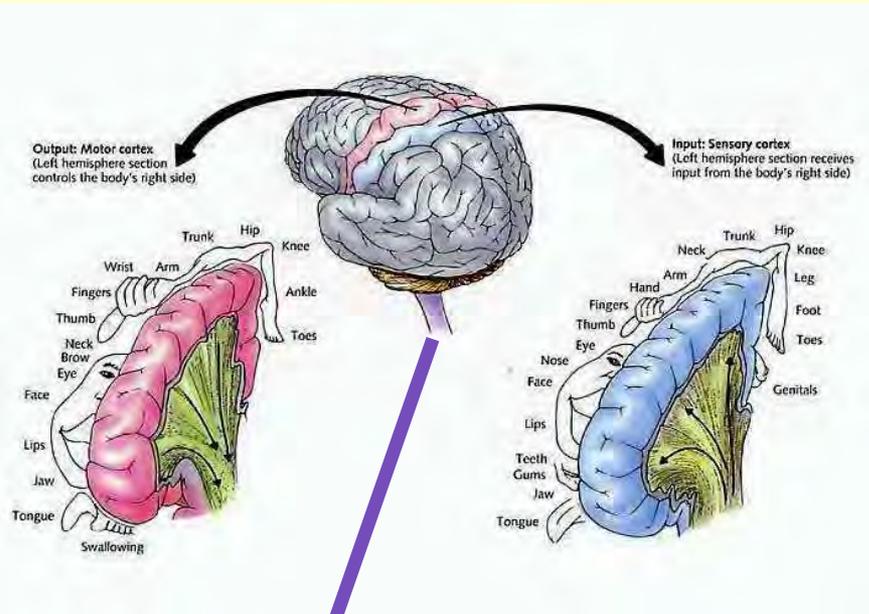
Implicite (Non-déclarative)

Non associatives

**Habituation**  
**Sensibilisation**

Associatives

**Conditionnement classique**



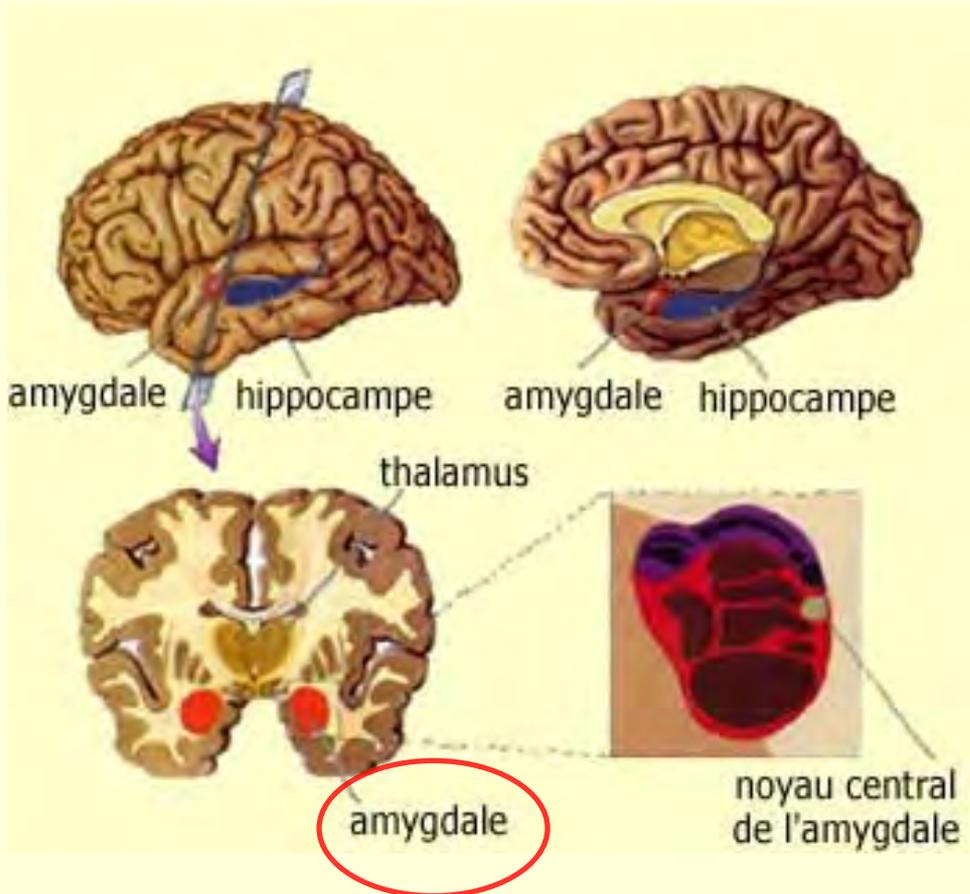


Peur conditionnée

Mémoire à long terme



Implicite (Non-déclarative)



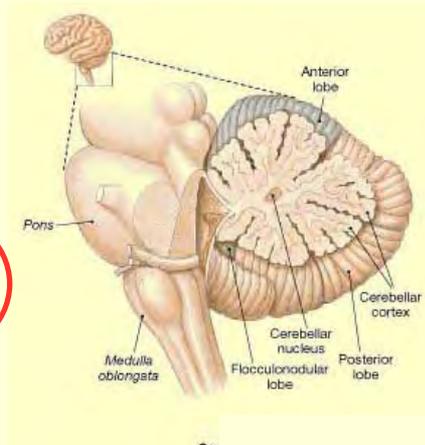
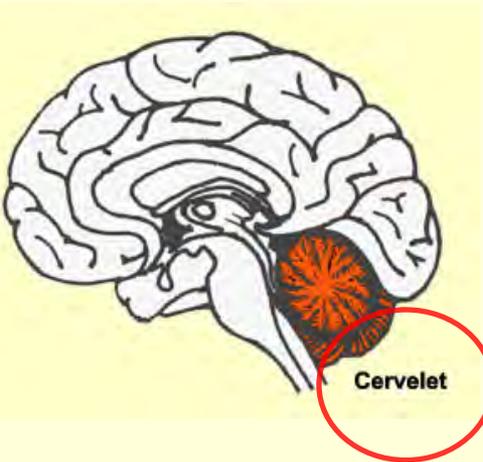
Non associatives

**Habituation**  
**Sensibilisation**

Associatives

**Conditionnement**  
**classique**

## Mémoire à long terme



Implicite (Non-déclarative)

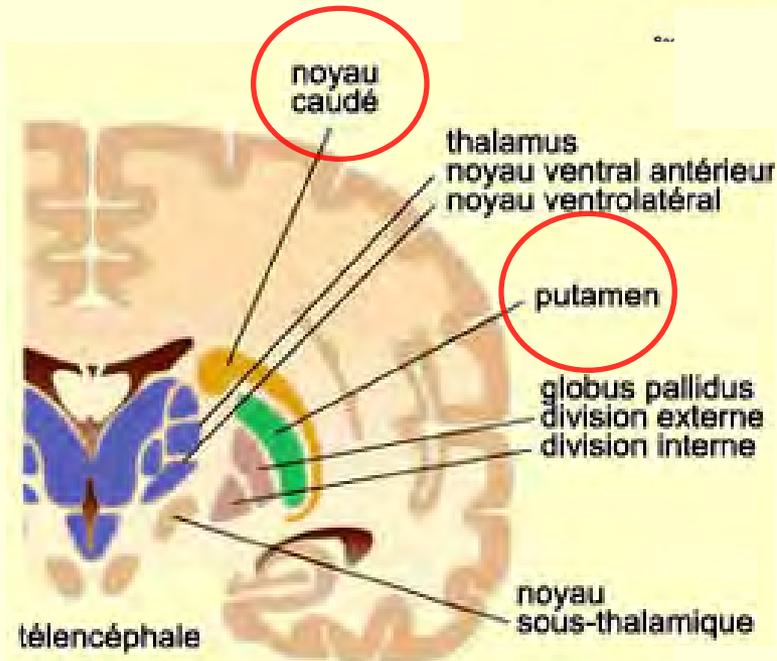
**Le BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Mardi, 13 octobre 2015

Le cortex moteur pas nécessaire pour exécuter une séquence de mouvement automatisée

**Conditionnement opérant**

**Procédurale (habiletés)**

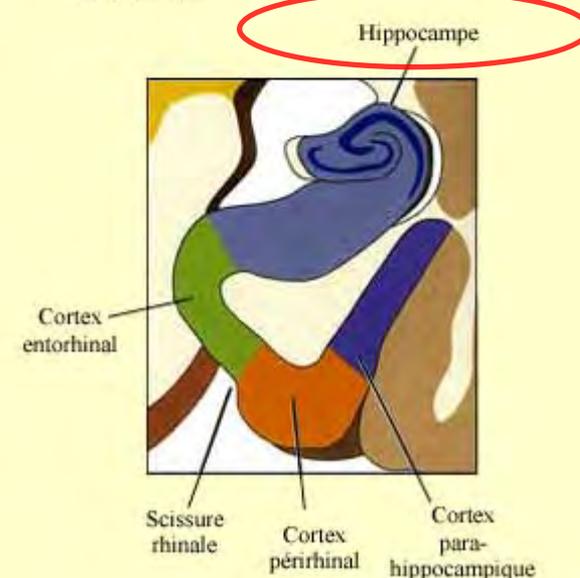
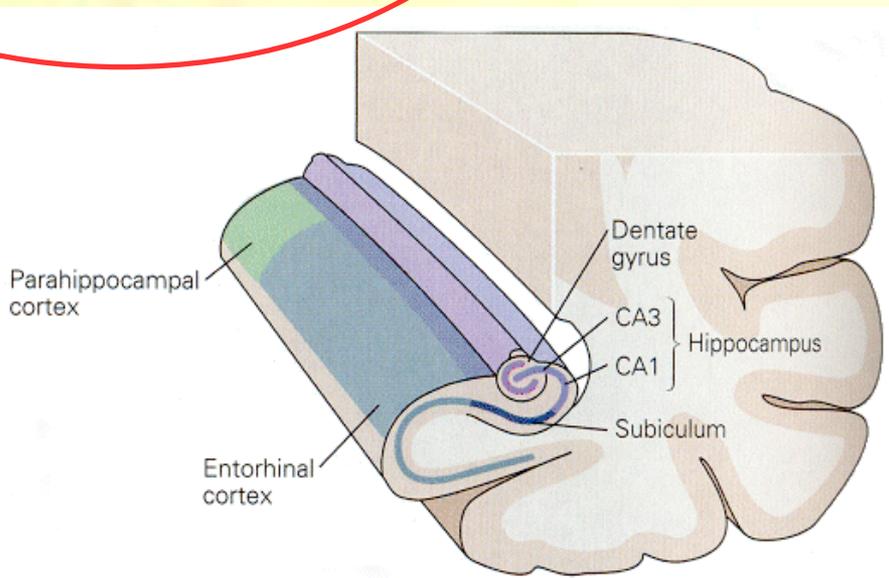
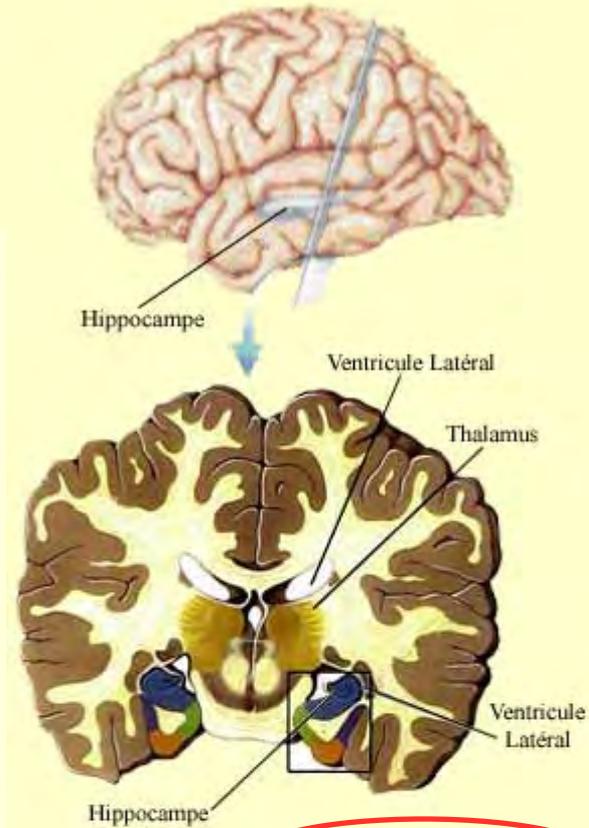


# Mémoire à long terme

Explicite (Déclarative)

Épisodique  
(événements  
biographiques)

Sémantique  
(mots, idées,  
concepts)



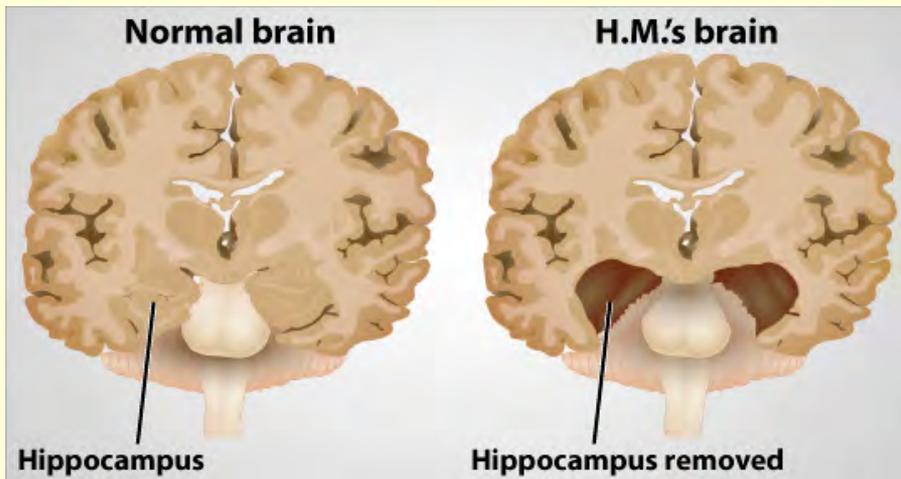


**Henry Molaison** (le fameux « patient H.M. ») était un jeune épileptique auquel on avait enlevé en 1953, à l'âge de 27 ans, les deux **hippocampes** cérébraux pour diminuer ses graves crises d'épilepsie.

**Neuropsychologue, 97 ans et toujours au travail**

**Mardi 9 février 2016**

[http://ici.radio-canada.ca/emissions/le\\_15\\_18/2014-2015/chronique.asp?idChronique=397417](http://ici.radio-canada.ca/emissions/le_15_18/2014-2015/chronique.asp?idChronique=397417)



Université du troisième âge des Laurentides et de Boucherville (21 janvier - 15 mars 2016)

**Cours 3: A- Évolution de nos mémoires et rôle de l'hippocampe; B- Apprendre à associer, de la liste d'épicerie aux championnats de mémoire**

Brenda Milner, neuropsychologue à l'Université McGill Photo : Institut de neurologie de Montréal / Université McGill

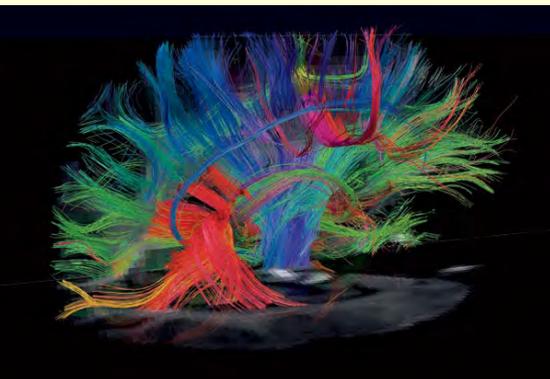
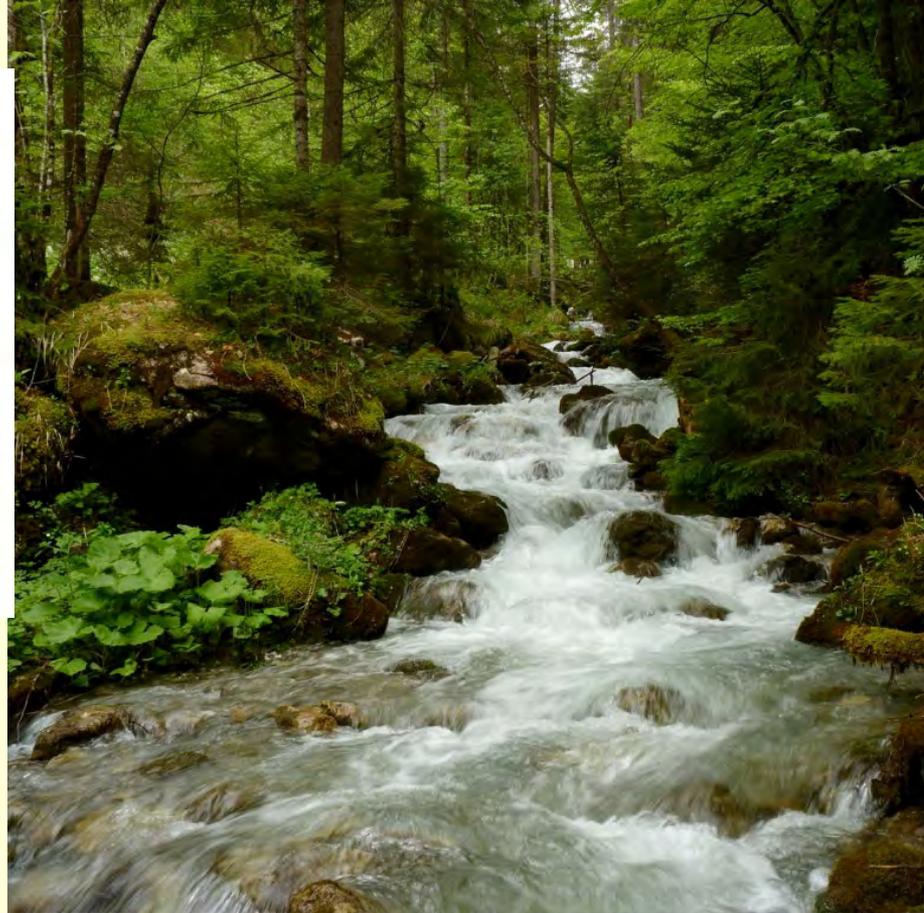
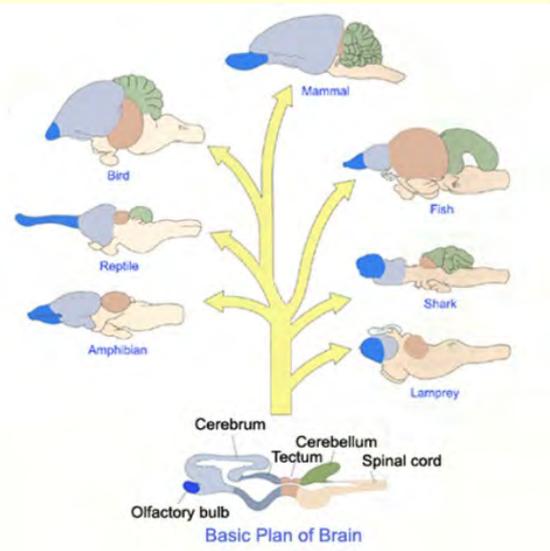
Une **métaphore** pour résumer  
ce qu'on a dit jusqu'ici...

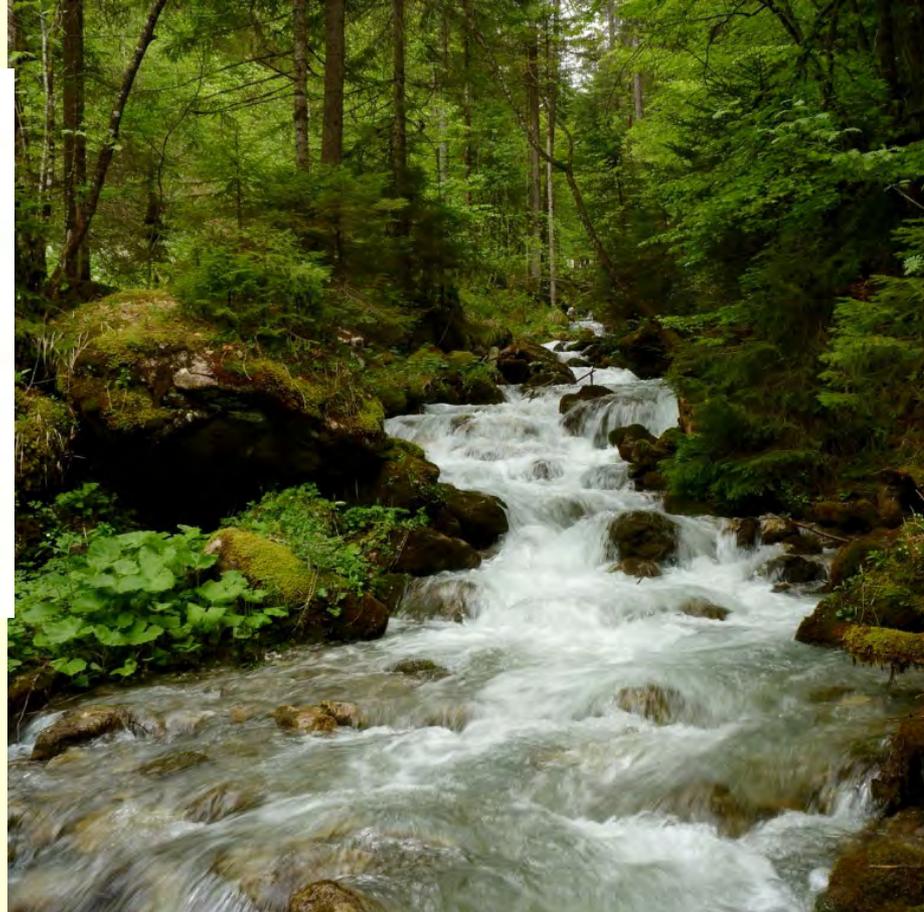
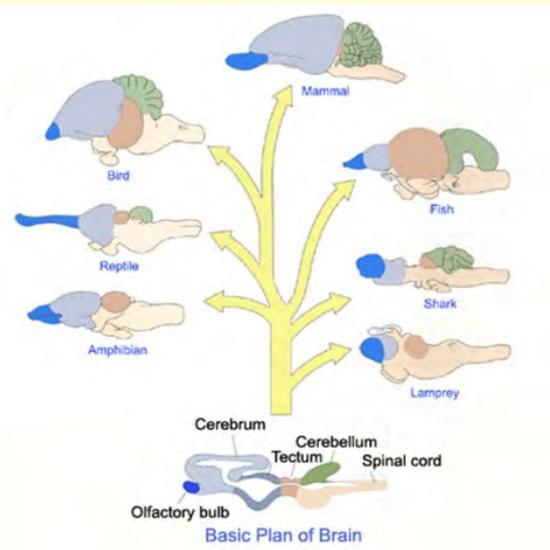




Le flux de l'eau est l'activité électrique du cerveau qui fluctue constamment.

Et ces fluctuations sont contraintes par le système nerveux humain issu de sa longue histoire évolutive.

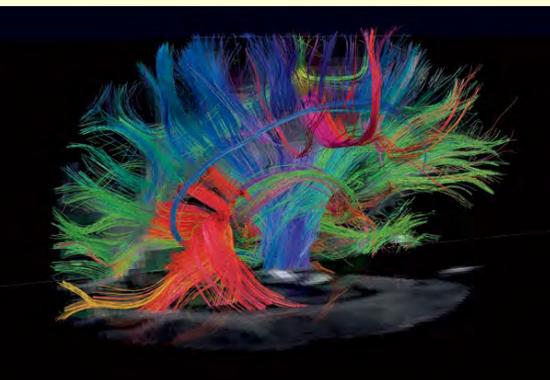


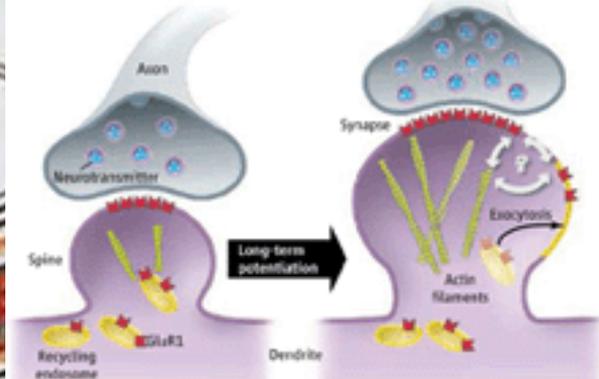
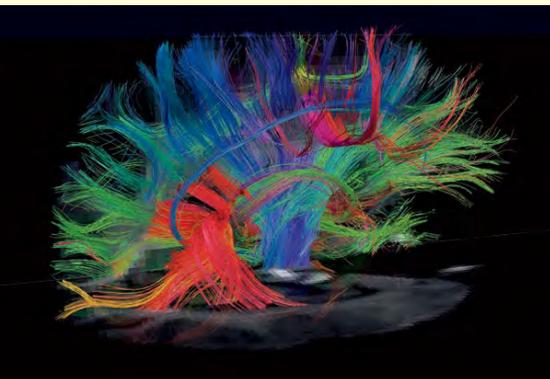
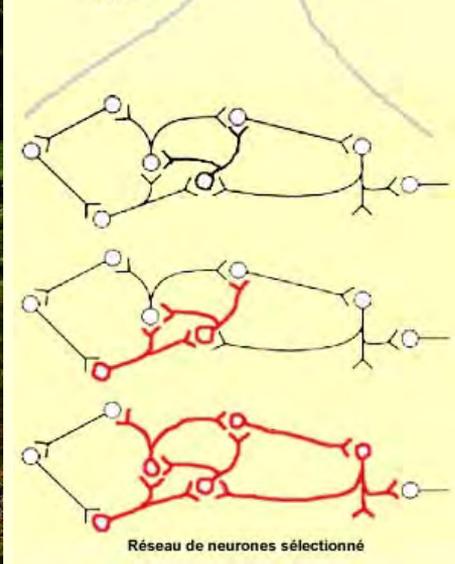
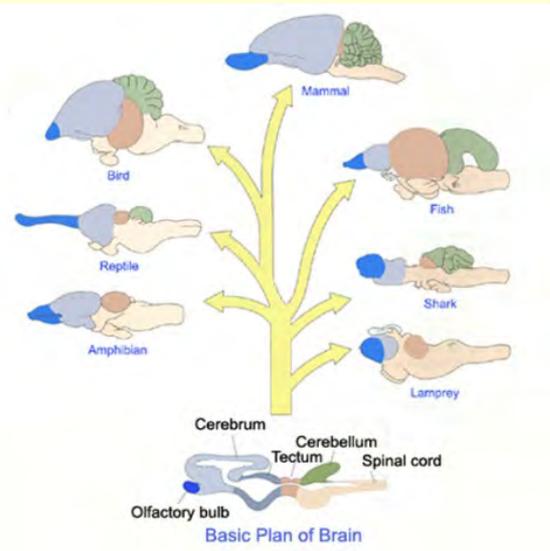


Mais sur une échelle de temps plus longue, le lit de la rivière est **érodé** par l'eau et **se modifie**.



Tout comme les petites routes de nos circuits nerveux sont modifiées par notre histoire de vie.





Et c'est dans la géographie complexe de ces réseaux de neurones et de leur activité dynamique que nous allons plonger après la pause...

