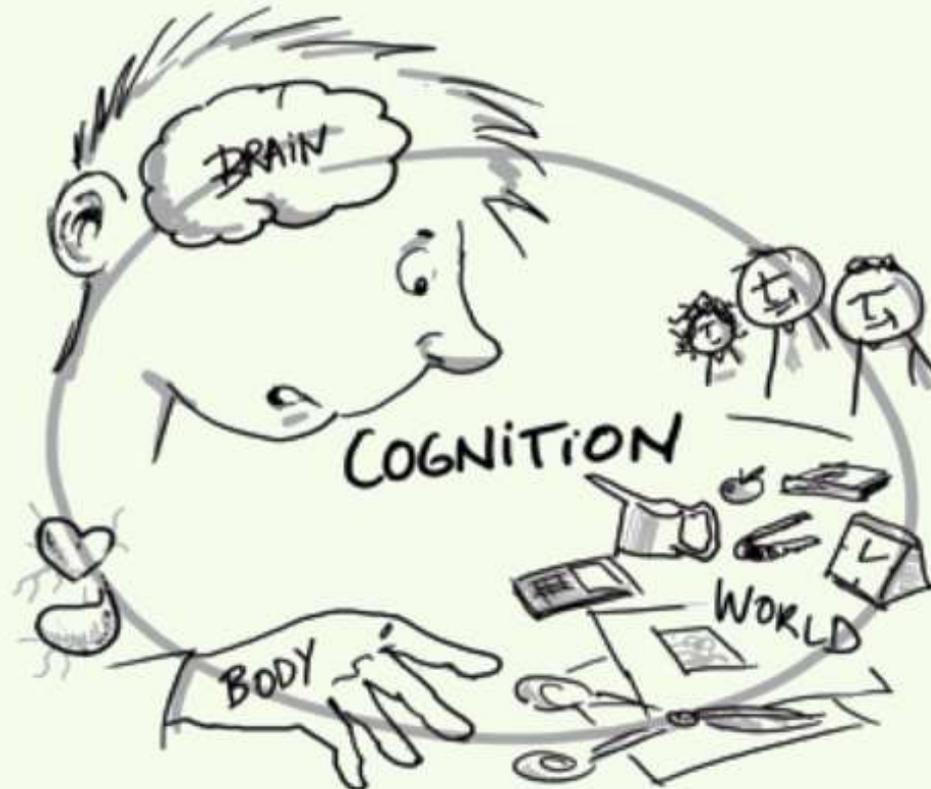


# L'apport des sciences cognitives... à tous les niveaux !

UTA Beloeil

Automne 2018

par Bruno Dubuc



# LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!

Un site web interactif sur le cerveau et les comportements humains

- 📍 Visite guidée
- 📍 Plan du site
- 📍 Diffusion
- 📍 Présentations
- 📍 Nouveautés
- 📍 English

## Principes fondamentaux



### Du simple au complexe

- Anatomie des niveaux d'organisation
- Fonction des niveaux d'organisation



### Le bricolage de l'évolution

- Notre héritage évolutif

### Le développement de nos facultés

- De l'embryon à la morale



### Le plaisir et la douleur

- La quête du plaisir
- Les paradis artificiels
- L'évitement de la douleur



### Les détecteurs sensoriels

- La vision



### Le corps en mouvement

- Produire un mouvement volontaire

## Fonctions complexes



### Au coeur de la mémoire

- Les traces de l'apprentissage
- Oubli et amnésie



### Que d'émotions

- Peur, anxiété et angoisse



### De la pensée au langage

- Communiquer avec des mots



### Dormir, rêver...

- Le cycle éveil - sommeil - rêve
- Nos horloges biologiques



### L'émergence de la conscience

- Le sentiment d'être soi

## Dysfonctions



### Les troubles de l'esprit

- Dépression et maniaque-dépression
- Les troubles anxieux
- La démence de type Alzheimer

## Le BLOGUE du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Chercher dans le blogue

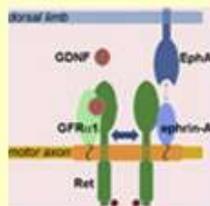
Envoyer

Catégories

- Au coeur de la mémoire
- De la pensée au langage

Lundi, 13 février 2012

### Des protéines qui guident le câblage cérébral



Le cerveau humain contient des millions de fois plus de connexions entre ses neurones que les quelque 20 000 ou 25 000 gènes contenus dans l'ADN de nos cellules. Et pourtant, durant le développement de notre cerveau, les extrémités des axones de nos neurones en développement ressemblent à de véritables « têtes chercheuses » qui réussissent à trouver leur cible spécifique à travers la soupe moléculaire complexe que constitue le milieu extracellulaire.

## Instituts de recherche en santé du Canada

Le cerveau à tous les niveaux est financé par l'Institut des neurosciences, de la santé mentale et des toxicomanies (INSMT), l'un des 13 instituts de recherche en santé du Canada (IRSC).

L'INSMT appuie la recherche dans différents domaines afin de réduire l'incidence des maladies du cerveau. L'INSMT fait ainsi progresser notre compréhension

# LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!

[Retour à l'accueil](#)

## Niveau d'explication

Débutant  
Intermédiaire  
Avancé



## Niveau d'organisation

- △ Social
- Psychologique
- Cérébral
- Cellulaire
- ▽ Moléculaire

### Thème

#### Le plaisir et la douleur



### Sous-thème

- La quête du plaisir
- Les paradis artificiels
- L'évitement de la douleur

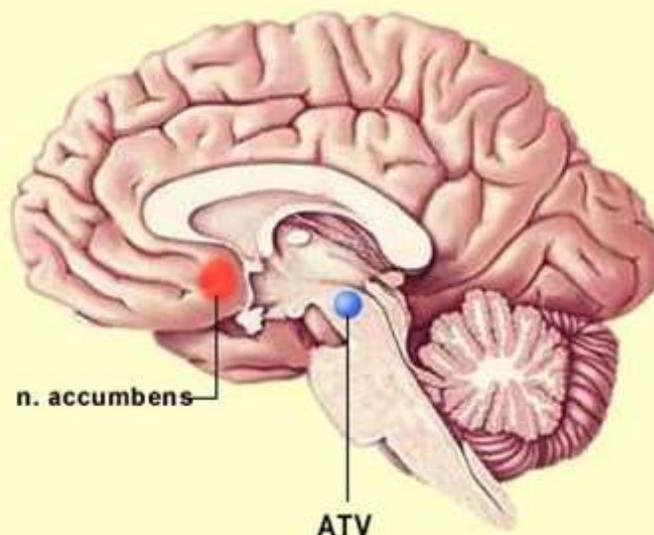


Un stimulus sensoriel qui n'apporte ni récompense ni punition est rapidement ignoré et oublié. C'est le phénomène de l'habituation qui nous fait oublier le contact de nos vêtements avec notre peau ou le tic tac de l'horloge du bureau.

## LES CENTRES DU PLAISIR

1

Pour qu'une espèce survive, ses individus doivent en premier lieu assurer leurs fonctions vitales comme se nourrir, réagir à l'agression et se reproduire. L'évolution a donc mis en place dans notre cerveau des régions dont le rôle est de "récompenser" l'exécution de ces fonctions vitales par une sensation agréable.



Ce sont ces régions, interconnectées entre elles, qui forment ce que l'on appelle le **circuit de la récompense**.

**L'aire tegmentale ventrale (ATV)**, un groupe de neurones situés en plein centre du cerveau, est particulièrement importante dans ce circuit. Elle reçoit de l'information de plusieurs autres régions qui l'informent du niveau de satisfaction des besoins fondamentaux ou plus spécifiquement humains.

# 3 niveaux d'explication

**Niveau d'explication**

**Débutant**

**Intermédiaire**

**Avancé**

◀ ◻ ▶



**LE CERVEAU À TOUTES LES NIVEAUX!**

Thème: **LE CERVEAU** / Niveau: **100%**

**LES FONCTIONS DU CERVEAU**

Le cerveau est un organe complexe qui contrôle toutes les activités de notre corps. Il est divisé en deux hémisphères, chacun spécialisé dans certaines fonctions. Les neurones, les cellules du cerveau, communiquent entre eux pour transmettre des informations.

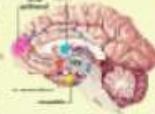


**LE CERVEAU À TOUTES LES NIVEAUX!**

Thème: **LE CERVEAU** / Niveau: **100%**

**LES FONCTIONS DU CERVEAU**

Le cerveau est un organe complexe qui contrôle toutes les activités de notre corps. Il est divisé en deux hémisphères, chacun spécialisé dans certaines fonctions. Les neurones, les cellules du cerveau, communiquent entre eux pour transmettre des informations.



**LE CERVEAU À TOUTES LES NIVEAUX!**

Thème: **LE CERVEAU** / Niveau: **100%**

**LES FONCTIONS DU CERVEAU**

Le cerveau est un organe complexe qui contrôle toutes les activités de notre corps. Il est divisé en deux hémisphères, chacun spécialisé dans certaines fonctions. Les neurones, les cellules du cerveau, communiquent entre eux pour transmettre des informations.



# LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!

[Retour à l'accueil](#)

## Niveau d'explication

Débutant  
Intermédiaire  
Avancé



## Niveau d'organisation

- △ Social
- Psychologique
- Cérébral
- Cellulaire
- ▽ Moléculaire

### Thème

#### Le plaisir et la douleur



### Sous-thème

- La quête du plaisir
- Les paradis artificiels
- L'évitement de la douleur

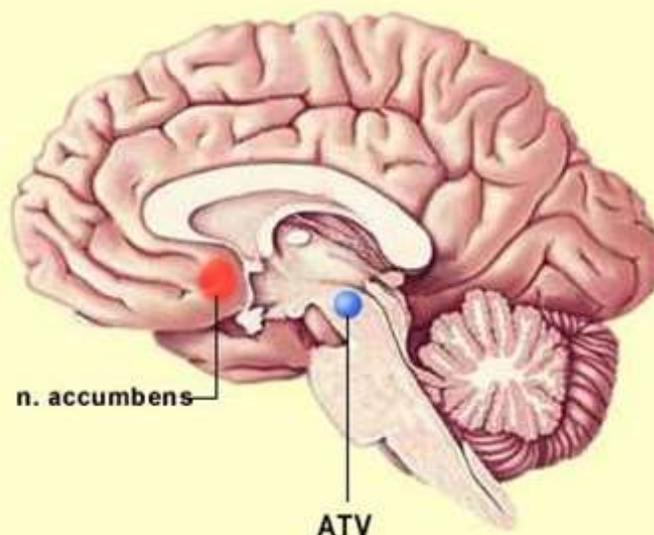


Un stimulus sensoriel qui n'apporte ni récompense ni punition est rapidement ignoré et oublié. C'est le phénomène de l'habituation qui nous fait oublier le contact de nos vêtements avec notre peau ou le tic tac de l'horloge du bureau.

## LES CENTRES DU PLAISIR

1

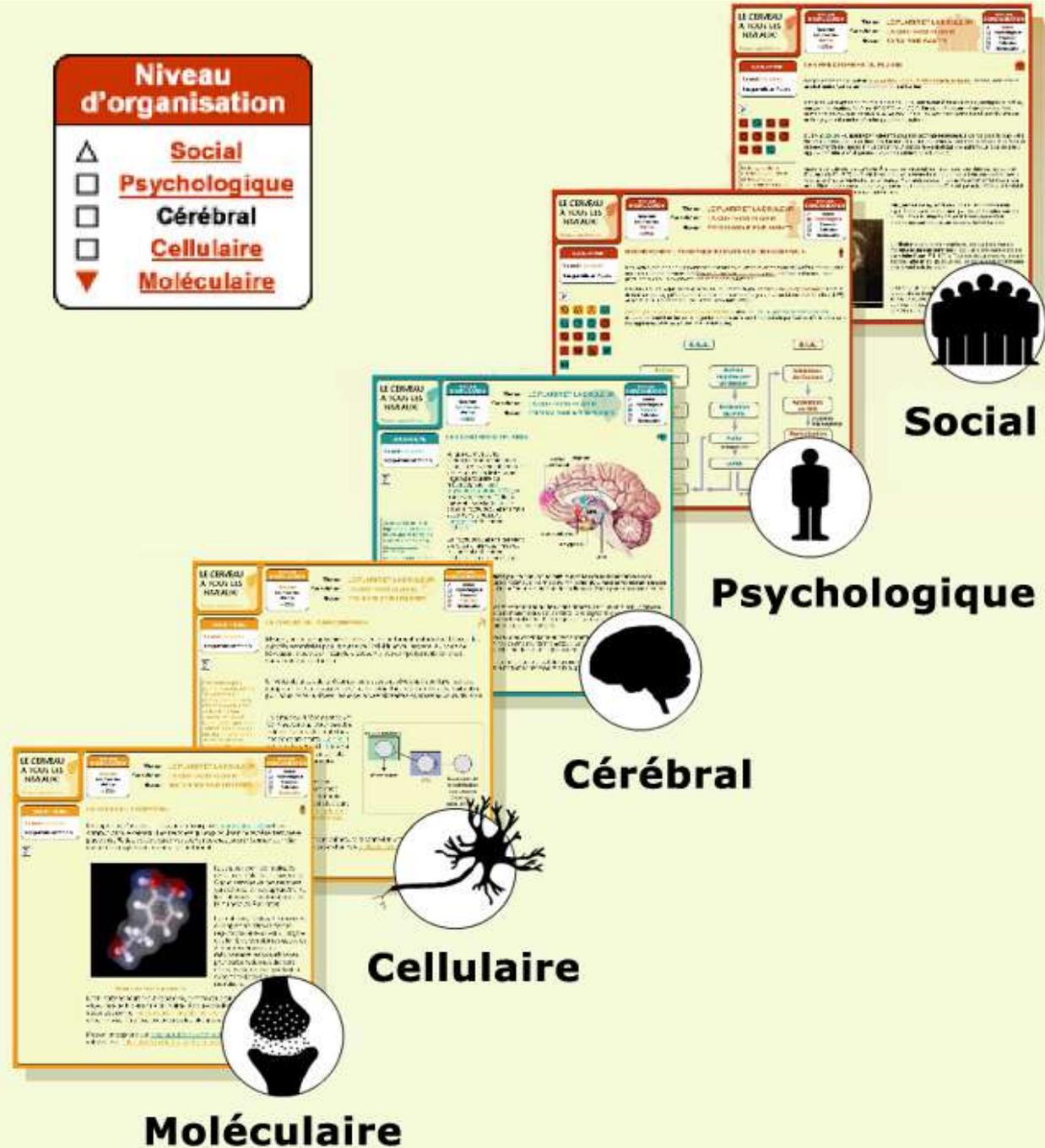
Pour qu'une espèce survive, ses individus doivent en premier lieu assurer leurs fonctions vitales comme se nourrir, réagir à l'agression et se reproduire. L'évolution a donc mis en place dans notre cerveau des régions dont le rôle est de "récompenser" l'exécution de ces fonctions vitales par une sensation agréable.



Ce sont ces régions, interconnectées entre elles, qui forment ce que l'on appelle le **circuit de la récompense**.

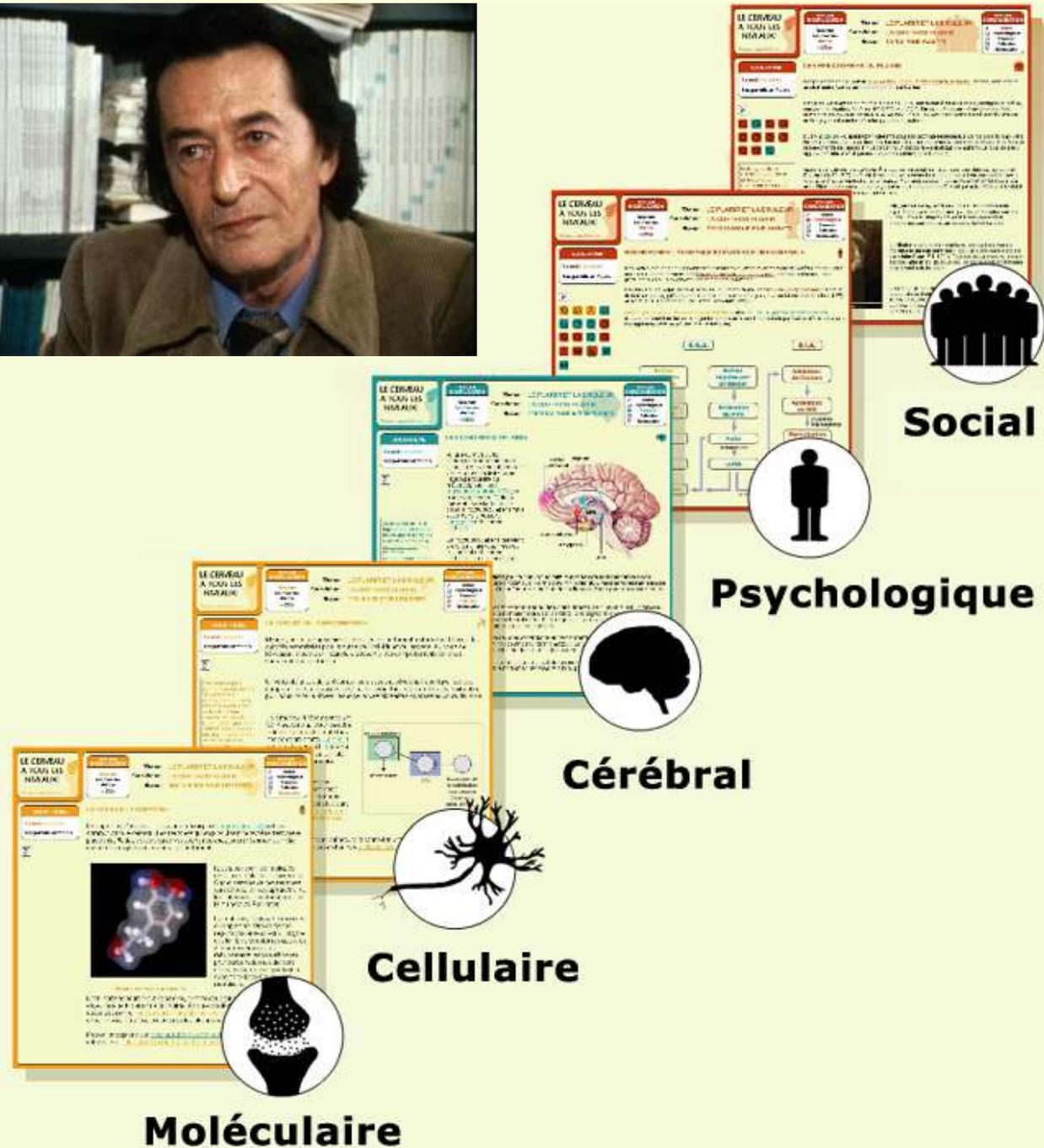
**L'aire tegmentale ventrale (ATV)**, un groupe de neurones situés en plein centre du cerveau, est particulièrement importante dans ce circuit. Elle reçoit de l'information de plusieurs autres régions qui l'informent du niveau de satisfaction des besoins fondamentaux ou plus spécifiquement humains.

# 5 niveaux d'organisation



« Actuellement [en **1975**] est en train de se bâtir une façon d'interpréter le comportement humain en situation sociale qui prend ses bases dans les molécules et qui, **de niveaux d'organisation en niveaux d'organisation**, [...] permet d'interpréter de façon assez nouvelle les comportements humains. »

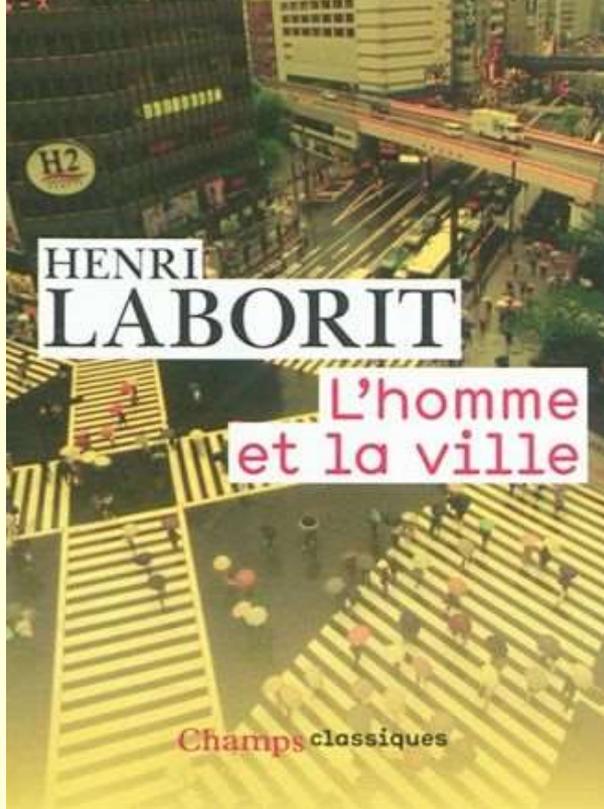
(Archives de la RTS, *Voix au chapitre*, 7 avril 1975)



« Cette conception des **niveaux d'organisation**, qui a complètement transformé ma vie il y a 40 ans, ne sont pas encore intégrés aujourd'hui et font faire des erreurs grossières de jugement et d'action.

Autour de nous, nos contemporains ne vivent qu'à un seul niveau d'organisation et ils ne traitent tous les événements qui leur apparaissent qu'à un seul niveau d'organisation, en général, celui qui les gratifie. »





LES DÉBROUILLARDS  
DRÔLEMENT SCIENTIFIQUE !

QUÉBEC SCIENCE

Institut de recherche en santé du Canada

LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!

Retour à l'accueil

Niveau d'explication

Débutant  
Intermédiaire  
Avancé

◀ □ ▶



ISC8000 -  
Séminaire d'introduction  
aux sciences cognitives :  
éléments et méthodologie



Cet hiver, le séminaire interdisciplinaire portera sur les Grands débats actuels en sciences cognitives. Il sera question des concepts, thèses et méthodes qui suscitent de vifs débats encore aujourd'hui comme la notion de modularité, la

# DES COURS DONNÉS DANS **GRATUITS** les BARS et les CAFÉS

**Révolution féministe**  
De la chambre à coucher, à l'économie de marché

**Plein gaz sur le schiste**

**Introduction à l'écologie sonore**

**L'éthique dans l'assiette**

**Parlons cerveau**

**La Mort se raconte**

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

Les séances, présentées par Bruno Dubuc, ont lieu au bar Les Pas Sages, 951, rue Rachel Est, les lundis suivants à 19 h :

**11 mai** L'infinitement complexe : le labyrinthe de nos réseaux cérébraux  
Tous les détails au [www.upopmontreal.com](http://www.upopmontreal.com)





UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

| *Voir au futur*

Accueil / Université du troisième âge

# Université du troisième âge

Accueil

Programmes

Bénévolat

UTA en bref

L'UTA et vous...

Étudiants

Professeurs



# LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!

- Mode d'emploi
- Visite guidée
- Plan du site
- Diffusion
- Présentations
- Nouveautés
- English

Recherche -> site + blogue

Google™ Recherche |

## Principes fondamentaux

- Du simple au complexe**
  - Anatomie des niveaux d'organisation
  - Fonction des niveaux d'organisation
- Le bricolage de l'évolution**
  - Notre héritage évolutif
- Le développement de nos facultés**
  - De l'embryon à la morale
- Le plaisir et la douleur**
  - La quête du plaisir
  - Les paradis artificiels
  - L'évitement de la douleur
- Les détecteurs sensoriels**
  - La vision
- Le corps en mouvement**
  - Produire un mouvement volontaire

## Fonctions complexes

- Au coeur de la mémoire**
  - Les traces de l'apprentissage
  - Oubli et amnésie
- Que d'émotions**
  - Peur, anxiété et angoisse
  - Désir, amour, attachement
- De la pensée au langage**
  - Communiquer avec des mots
- Dormir, rêver...**
  - Le cycle éveil - sommeil - rêve
  - Nos horloges biologiques

## Dysfonction

- Les troubles
- Dép
- Les
- La c

Nouveau! "L'école des profs"

# "L'école des profs"

## Cours intensifs de perfectionnement en neurosciences cognitives

(cliquez ici pour les détails)

Fonctions supérieures, libre arbitre et éducation

Vers une cognition incarnée

Des réseaux de neurones qui oscillent de manière dynamique

D'où venons-nous et que faisons-nous ?

Ancienne et nouvelle grammaire de la communication neuronale

## Le BLOGUE du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Accueil du site

Recherche -> blogue

Billets par catégorie

Abonnez-vous !

NOUVELLES RÉCENTES SUR LE CERVEAU

Lundi, 5 septembre 2016

« La cognition incarnée », séance 1 : Survol historique des sciences cognitives et présentation du cours



Comme promis il y a deux semaines, voici donc un bref aperçu du premier cours sur la « cognition incarnée » que je donnerai mercredi à 18h au local A-1745 du pavillon Hubert-Aquin de l'UQAM. Et

Les Power Points de chaque présentation seront mis sur **la page « L'école des profs »** accessible par **la page d'accueil** du Cerveau à tous les niveaux quelques jours après avoir été donnés.

Recherche -> blogue

Billets par catégorie



Abonnez-vous !

NOUVELLES  
RÉCENTES  
SUR LE CERVEAU



Deric Bownds'  
Mindblog



Neuroforecasting crowd  
funding outcomes

Do Americans care  
about rising inequality?

How to regulate Artificial  
Intelligence

How "ought" exceeds  
but implies "can"

Debate over a scientific  
wellness study.

BrainFacts.org



Lundi, 11 septembre 2017

## Ma série de cours résumée dans ce blogue les 8 prochaines semaines



Pour les deux prochains mois à partir de la semaine prochaine, je vous propose un format un peu différent pour ces billets de bogue du lundi que je publierai... le mardi ! Explication du pourquoi et du comment...

Le pourquoi, c'est que je donnerai à partir de la semaine prochaine **ma série de 8 cours de 2h15 environ** dans deux **universités du troisième âge (UTA)** de la région de Montréal, celle de Longueuil et celle de St-Bruno. Ma journée du lundi et celle du mercredi seront donc en grande partie consacrées à ce cours, ce qui ne me permettra pas d'écrire mon billet le lundi comme à mon habitude **depuis bientôt 7 ans**. Je me suis donc dit que je l'écrirais le mardi. Mais je me connais : je voudrai plutôt améliorer les choses qui ont moins bien passées dans mon cours de la veille pour mon cours du lendemain, tenir compte de certaines questions des gens, etc. Bref, je ne serai pas en mesure de bien résumer des articles scientifiques récemment parus parce que j'aurai la tête ailleurs. Que faire alors ?

## Trois remarques avant de commencer :

1)

Je ne suis pas médecin. Je ne suis pas professeur. Je ne suis pas spécialiste.

Je suis un « généraliste » né avec une maladie incurable... la curiosité !

**« Je suis  
parce que je suis ému  
et parce que tu le sais ! »**

- Jean-Didier Vincent,  
*Biologie des passions* (1986)



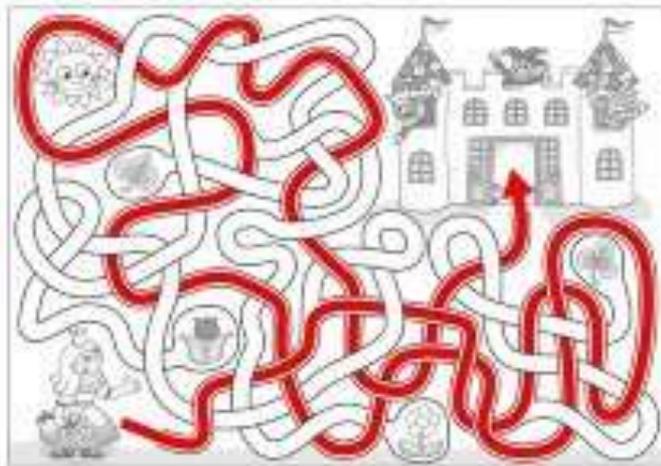
2) Les connaissances scientifiques dans un vaste domaine comme les sciences cognitives sont virtuellement infinies (et généralement on ne se plaint pas que mes cours en manquent...)

Mais en 20h de cours, on ne pourra donner qu'une image bien partielle...



D'où la difficulté de trouver un chemin pédagogique dans ce labyrinthe de connaissance...

...et 3) **essayer de me renouveler** tant dans le contenu de mes cours qu'au niveau de mon approche pédagogique durant nos 8 séances.



À commencer par prendre quelques minutes pour vous demander si vous avez des attentes en termes de contenu pour le cours...



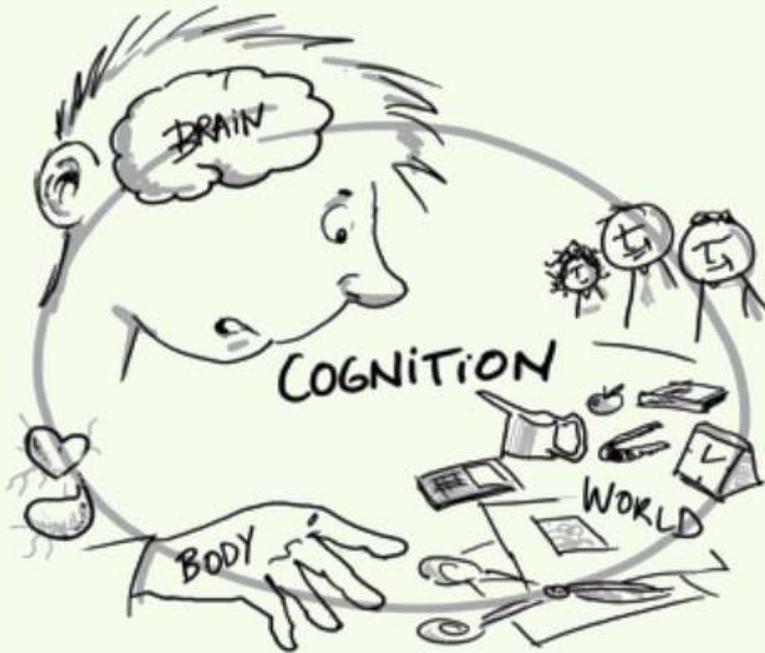
- Cours 1 :** Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)
- Cours 2 :** Un neurone, deux neurones, quelques neurones (la grammaire de base du cerveau)
- Cours 3 :** Des milliers et des millions de neurones (des structures cérébrales distinctes)
- Cours 4 :** Des milliards de neurones (qui forment des réseaux à l'échelle du cerveau entier)
- Cours 5 :** Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps
- Cours 6 :** Tout ce qui précède dans un corps situé dans un environnement
- Cours 7 :** Tout ce qui précède fait émerger les « fonctions supérieures »
- Cours 8 :** Tout ce qui précède pour considérer de grandes questions (libre arbitre, éducation, etc.)

# Plan du cours

- Cours 1 :** Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)  
A- Vue d'ensemble et niveaux d'organisation  
B- Du Big Bang aux primates (- 13,7 milliards d'années à – 65 millions d'années)
- Cours 2 :** Un neurone, deux neurones, quelques neurones (la grammaire de base du cerveau)  
A- Des primates aux sociétés humaines (de – 65 millions d'années à 1900)  
B- De la théorie du neurone au piège du « cerveau-ordinateur » (1900-1980)
- Cours 3 :** Des milliers et des millions de neurones (des structures cérébrales distinctes)  
A- Évolution de nos mémoires et rôle de l'hippocampe  
B- Apprendre à associer, de la liste d'épicerie aux championnats de mémoire
- Cours 4 :** Des milliards de neurones (qui forment des réseaux à l'échelle du cerveau entier)  
A- Cartographie anatomique du cerveau d'hier à aujourd'hui  
B- Imagerie cérébrale fonctionnelle : voir nos réseaux cérébraux s'activer
- Cours 5 :** Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps  
A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier  
B- Éveil, sommeil et rêve
- Cours 6 :** Tout ce qui précède dans un corps situé dans un environnement  
A- La cognition incarnée (liens système nerveux, hormonal et immunitaire)  
B- La cognition située et la prise de décision
- Cours 7 :** Tout ce qui précède fait émerger les « fonctions supérieures »  
A –Les « fonctions supérieures » : l'exemple de la lecture et de l'attention  
B- Les analogies, les concepts et leur représentation cérébrale
- Cours 8 :** Tout ce qui précède pour considérer de grandes questions (libre arbitre, éducation, etc.)  
A- Quelques grandes questions à la lumière des sciences cognitives modernes  
B- Vers où aller maintenant : plaider pour une pédagogie qui tient compte de tout

# Cours 1: Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)

A- Vue d'ensemble et  
niveaux d'organisation  
(plus courte)

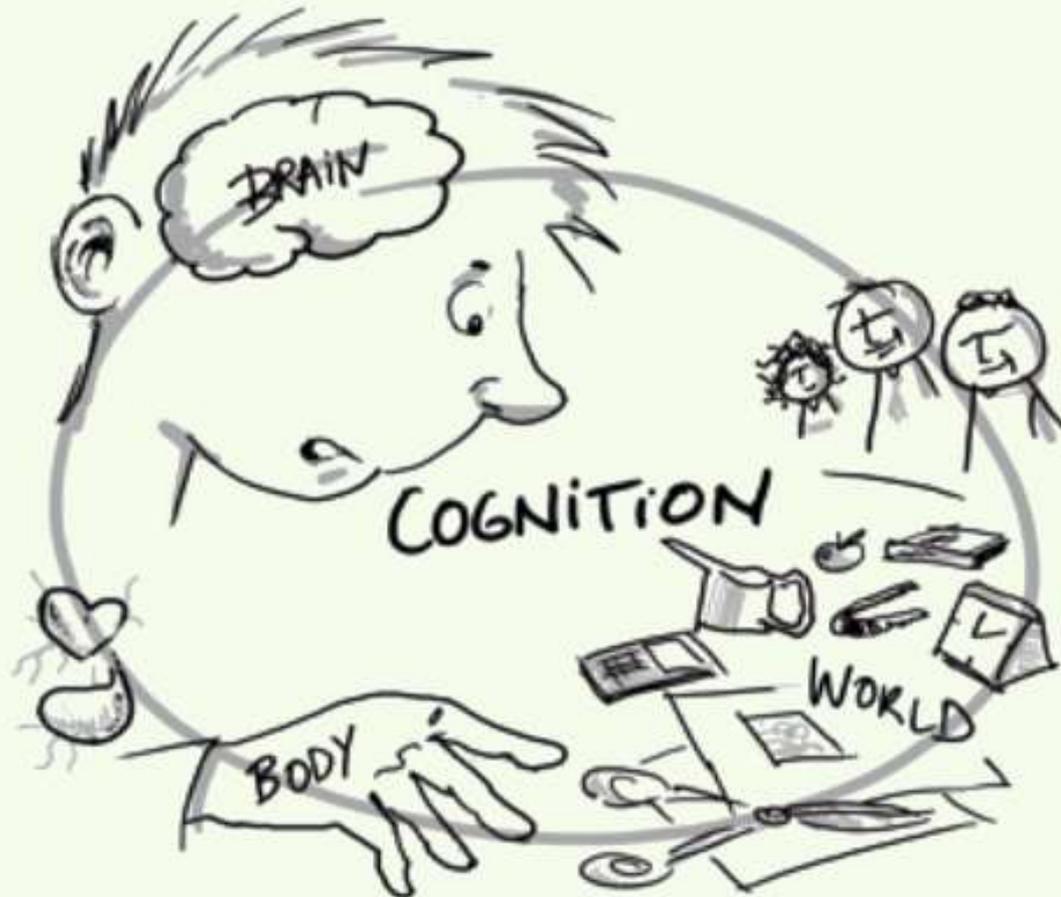


B- Du Big Bang aux primates  
(- 13,7 milliards d'années  
à - 65 millions d'années)  
(plus longue)

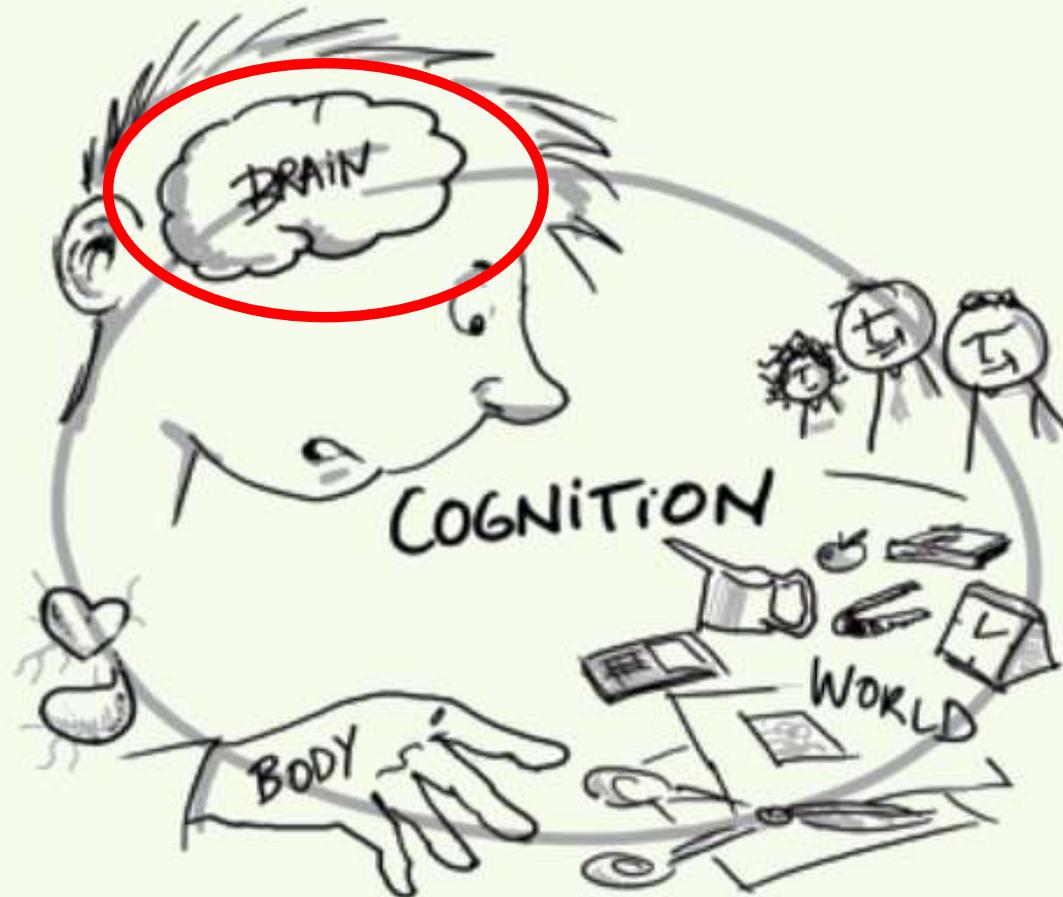


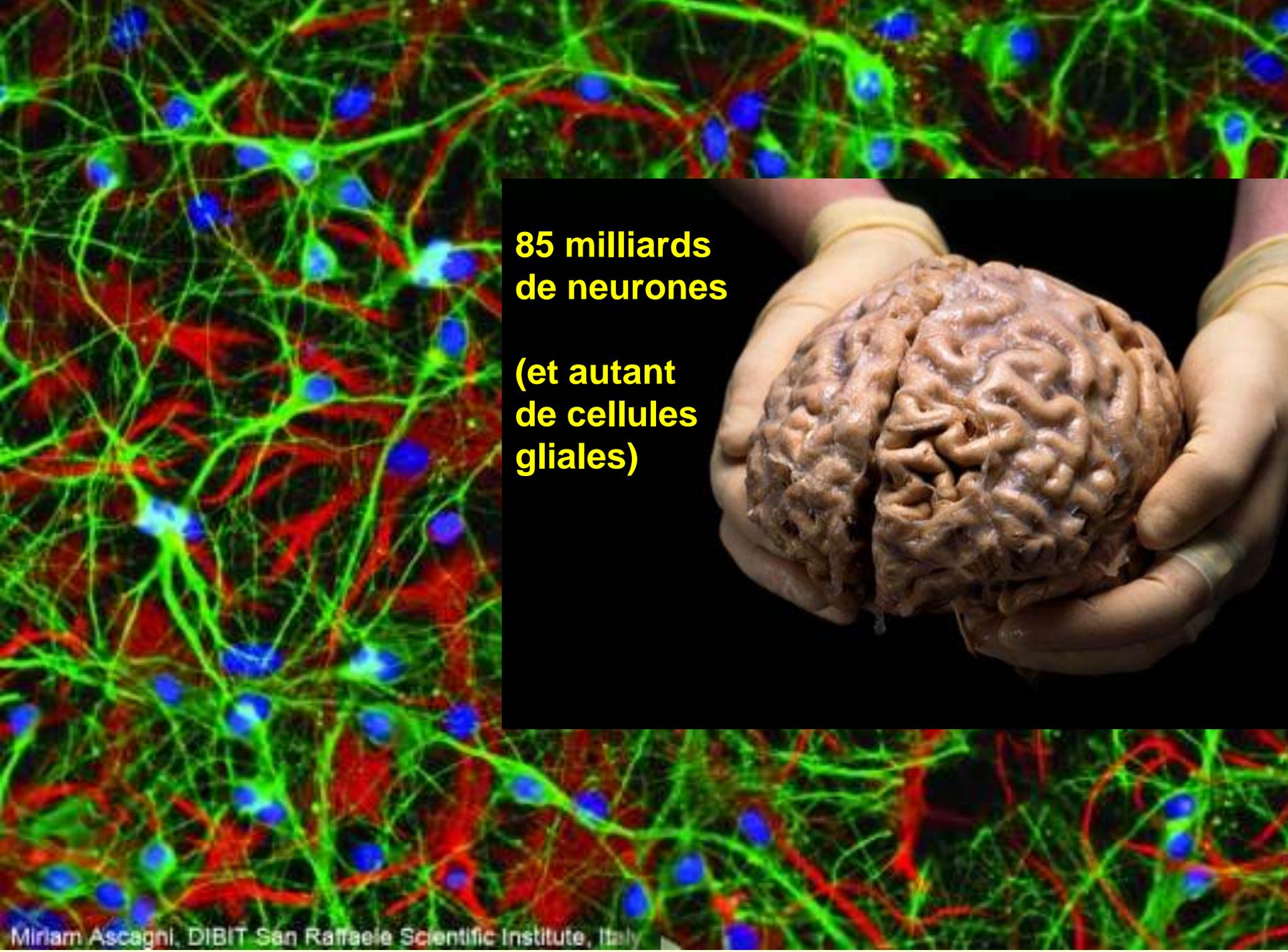
# Cerveau – Corps - Environnement

Autre idée importante qui découle des niveaux d'organisation et qui va traverser tout le cours !



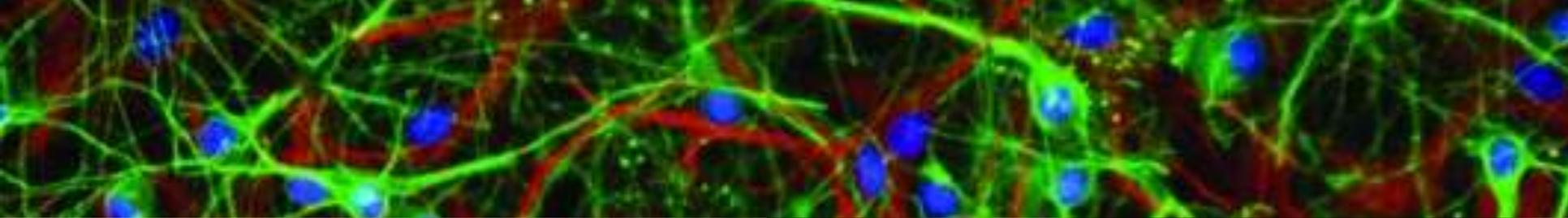
# Cerveau – Corps - Environnement



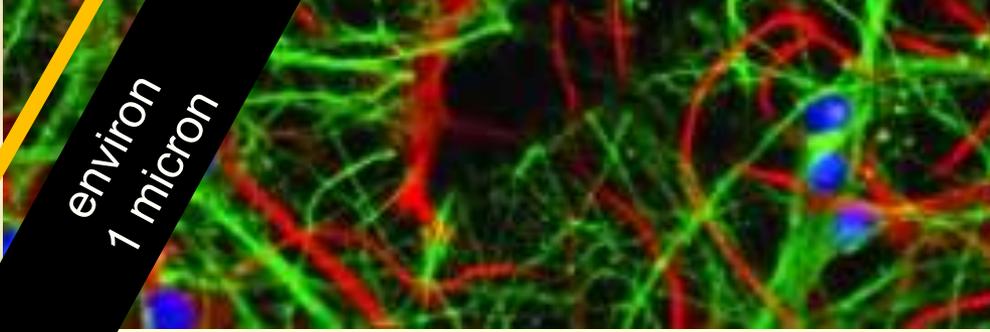
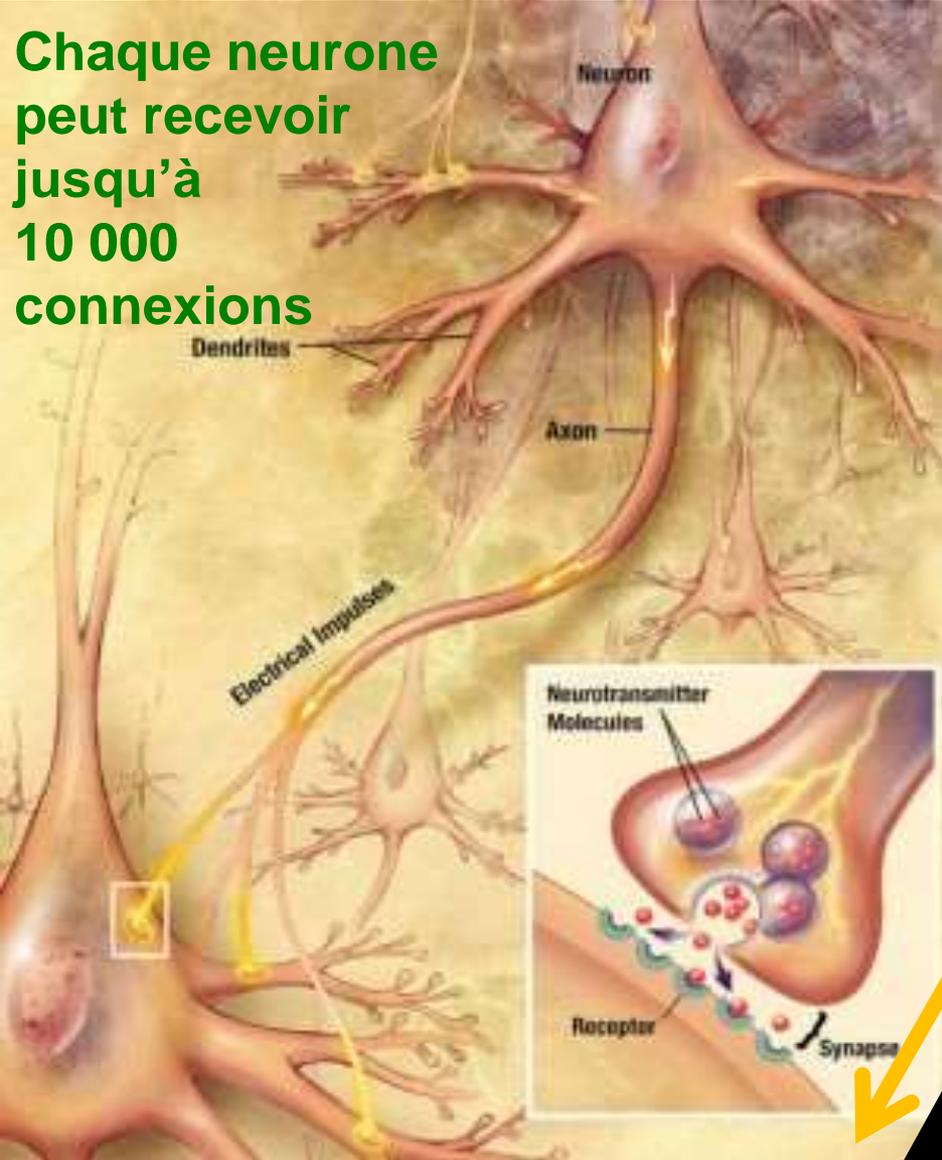


**85 milliards  
de neurones**

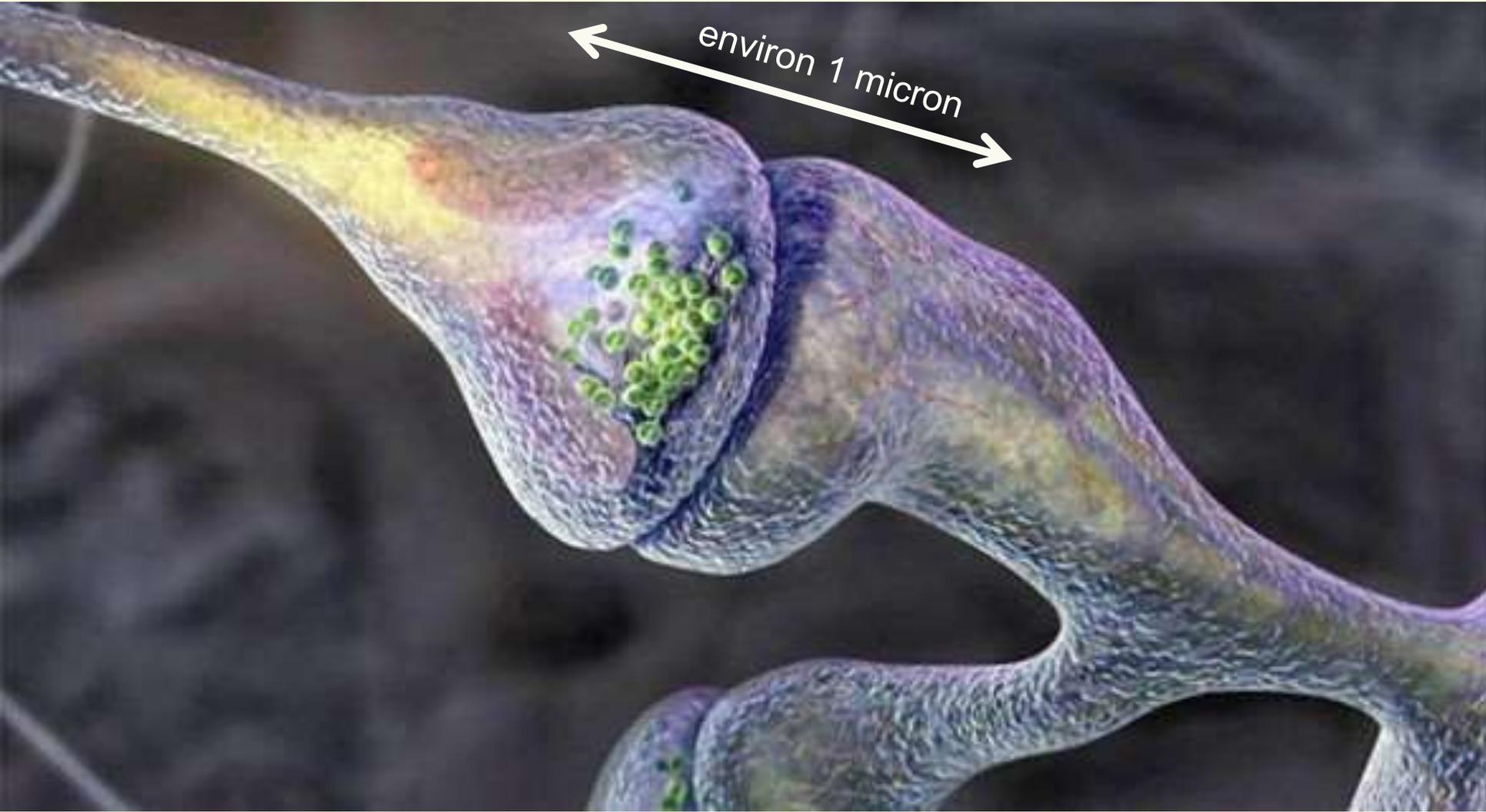
**(et autant  
de cellules  
gliales)**



Chaque neurone  
peut recevoir  
jusqu'à  
10 000  
connexions



environ  
1 micron

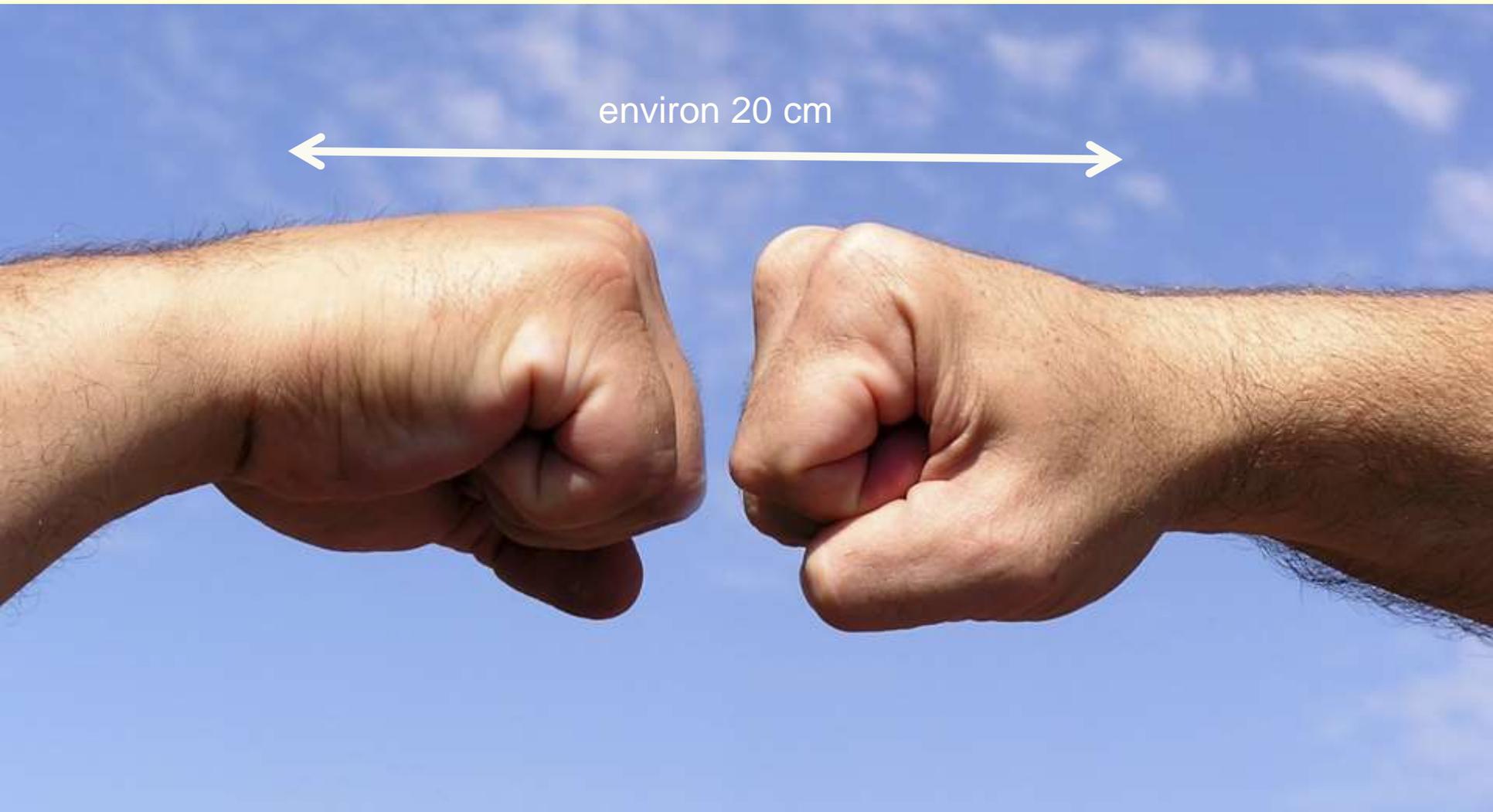


environ 1 micron

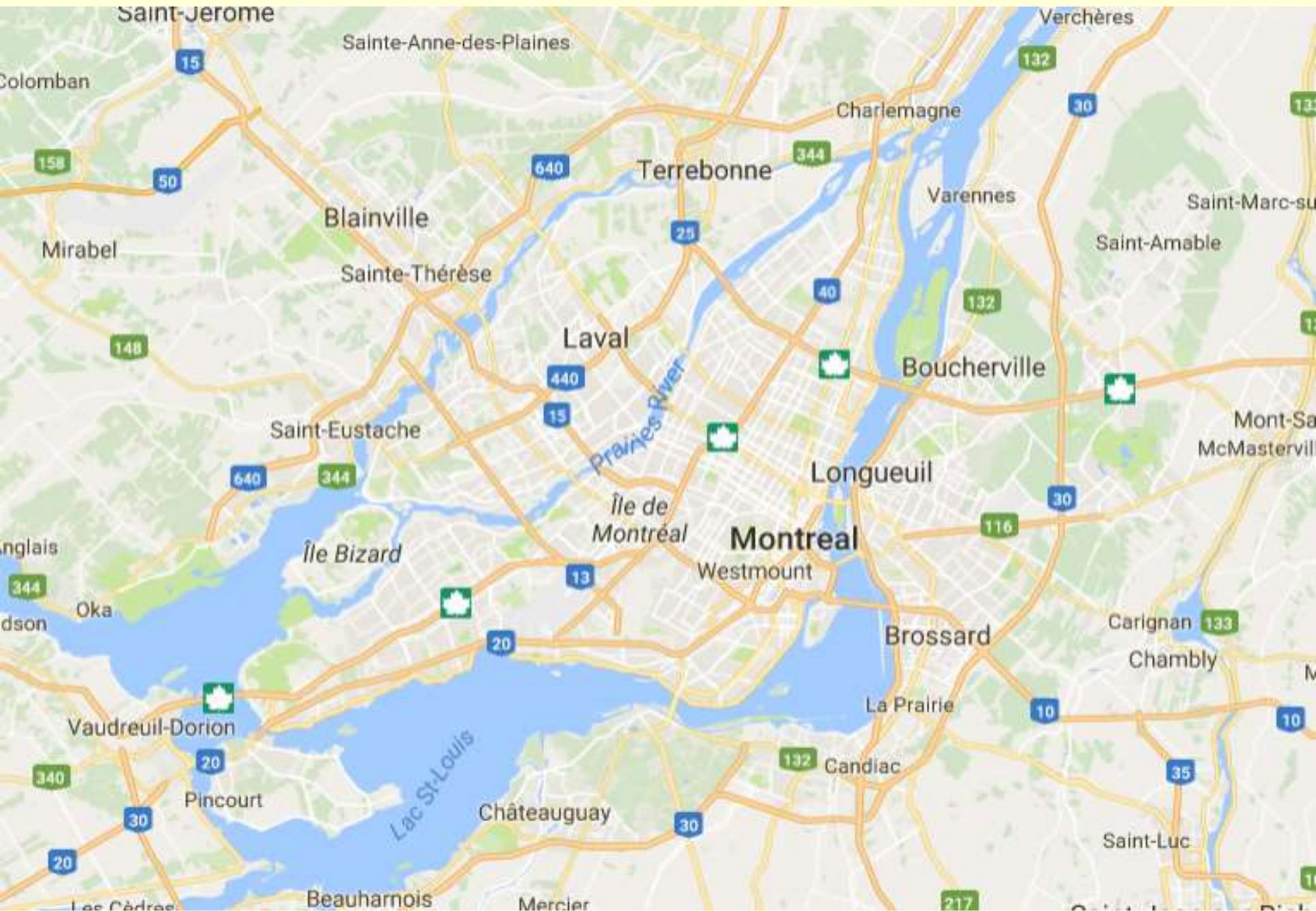


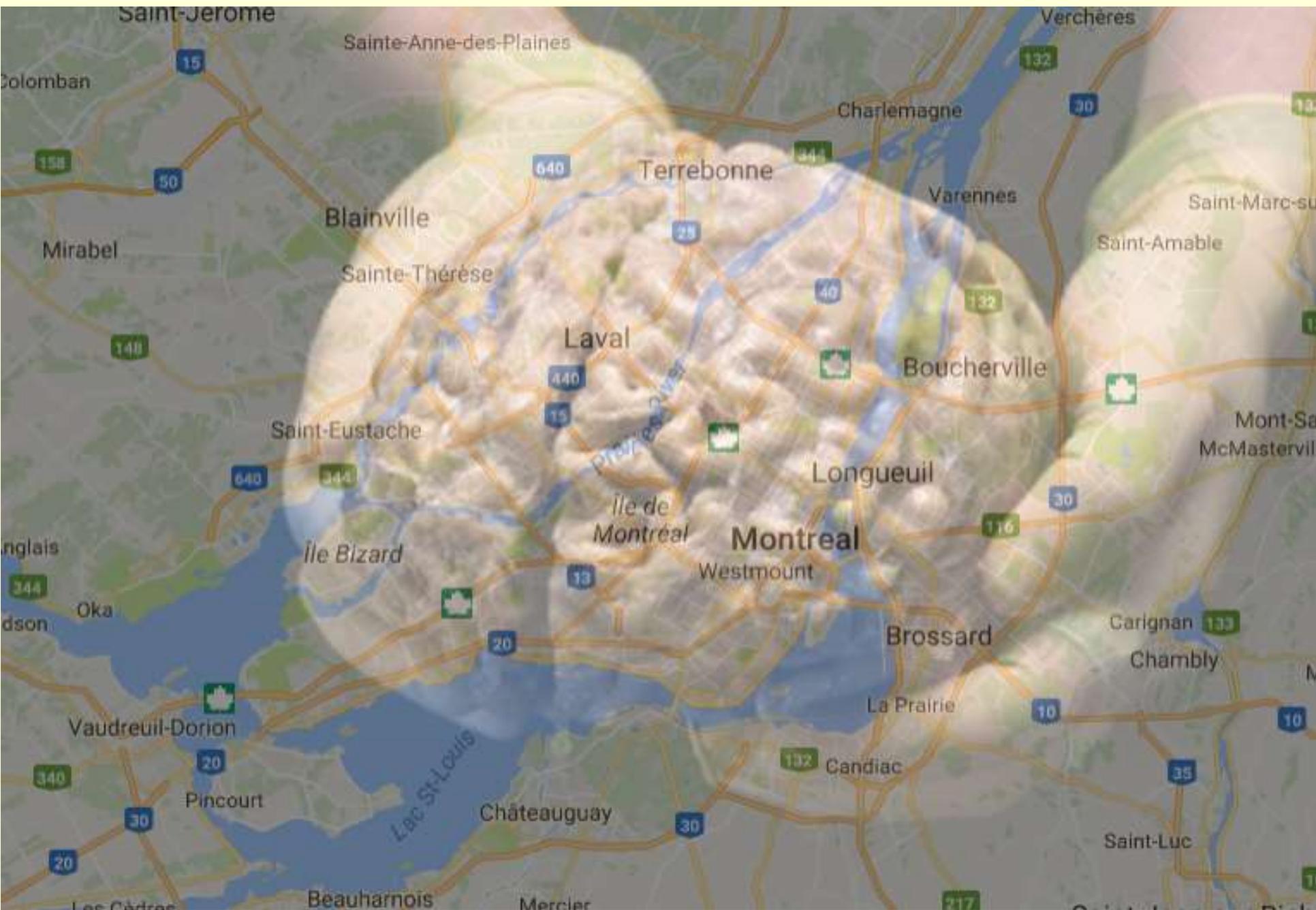
environ 20 cm

Quelle devrait être la taille d'un cerveau  
dont les synapses auraient la taille de deux poings ?



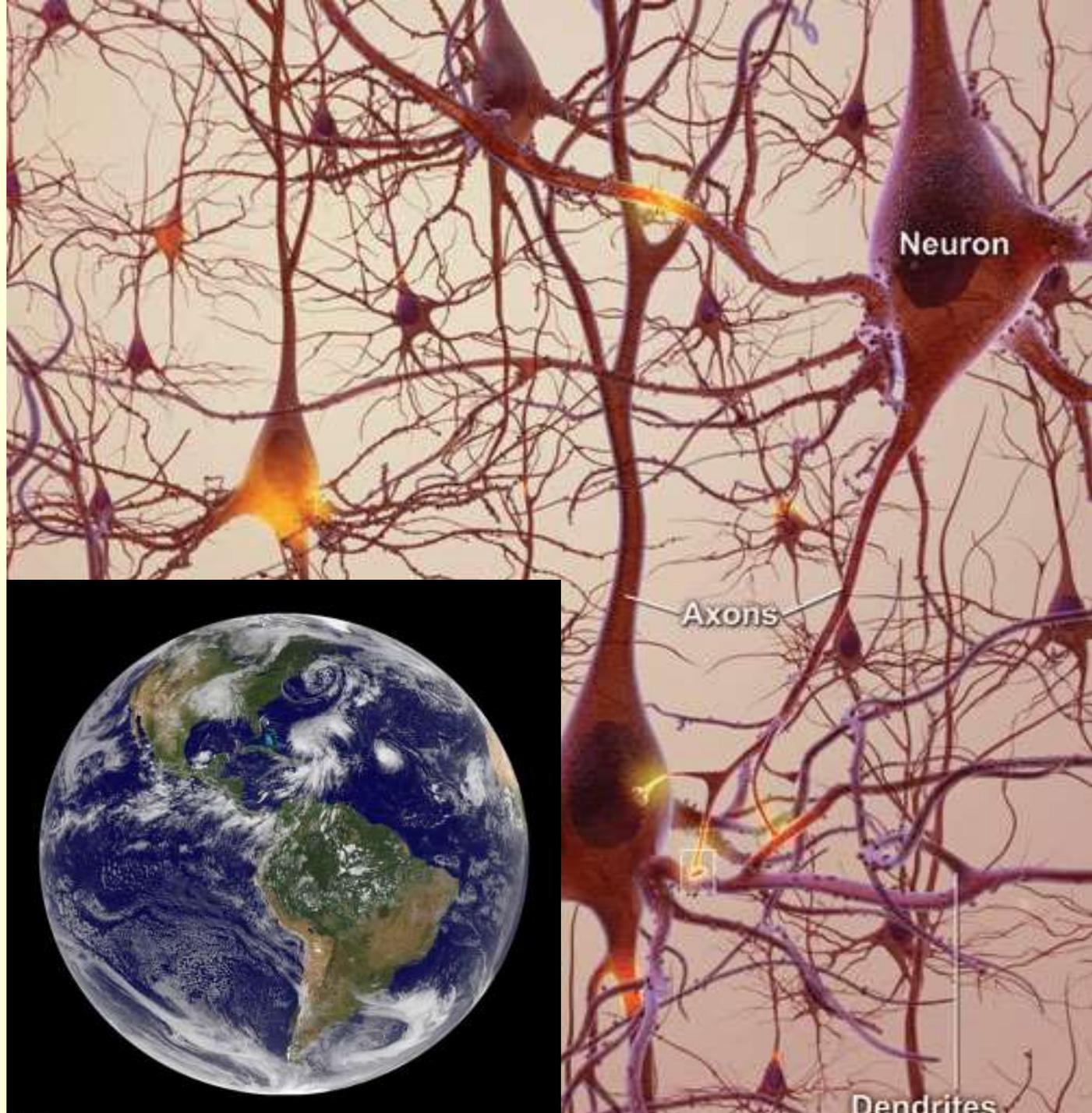
Alors :  $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} / 0,000\ 001 \text{ m} = 40\ 000 \text{ m} = \mathbf{40 \text{ km}}$



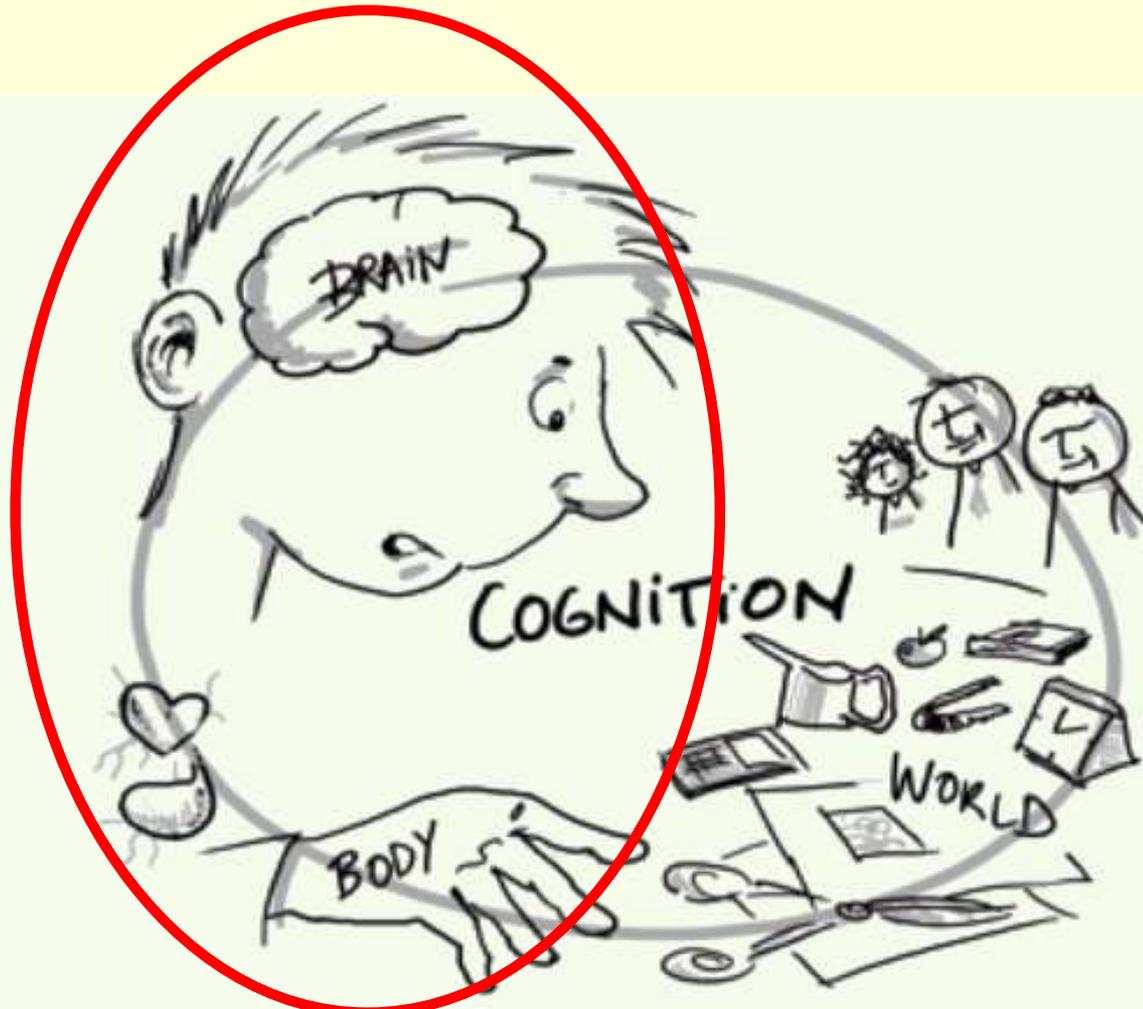


Et si on mettait  
bout à bout tous  
ces petits câbles,

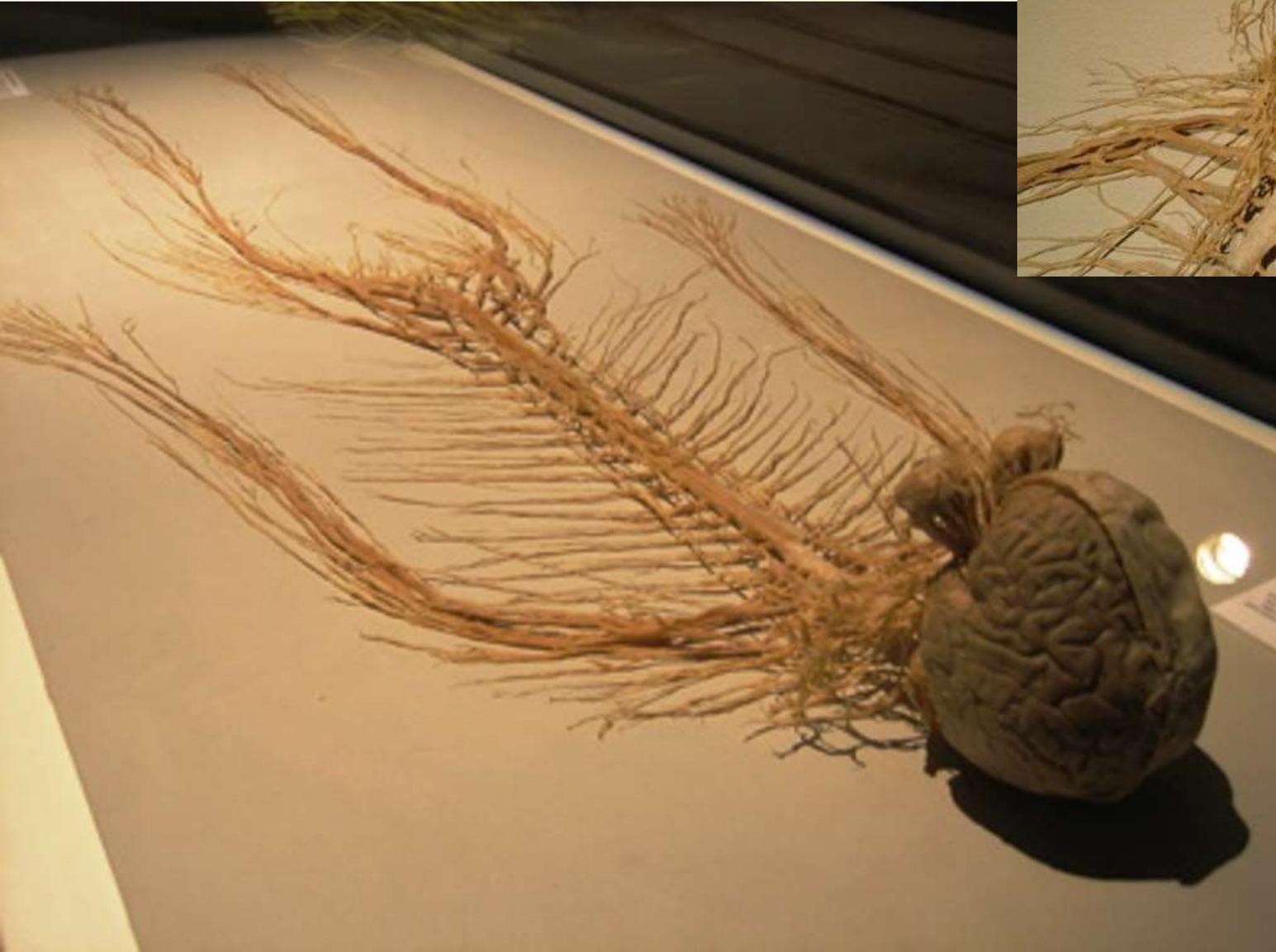
on a estimé  
qu'on pourrait  
faire plus de  
**4 fois le tour  
de la Terre**  
avec le contenu  
d'un seul cerveau  
humain !

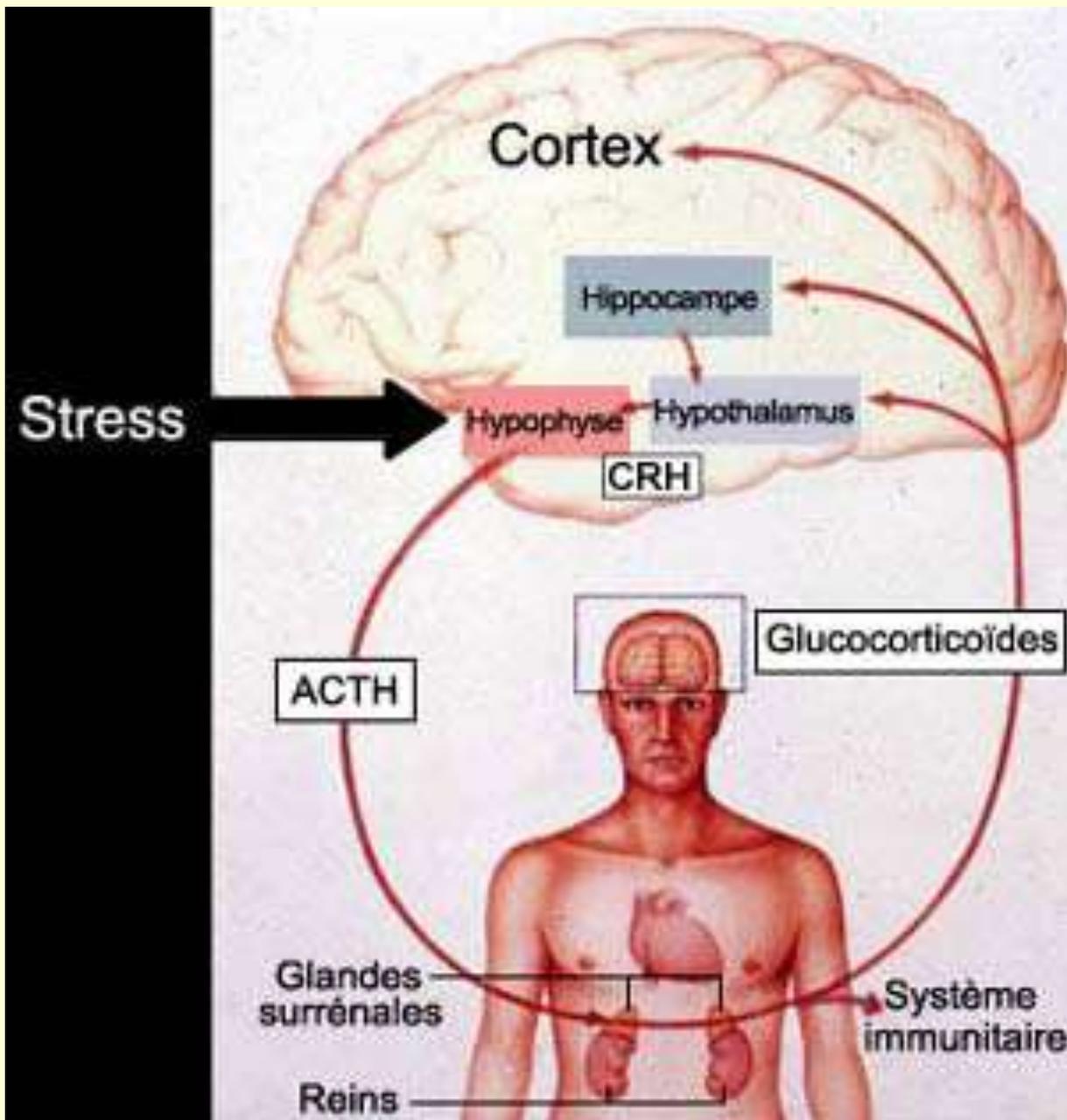


# Cerveau – Corps - Environnement



Car il y a aussi tous les nerfs du système nerveux **périphérique** et des **nerfs crâniens**...



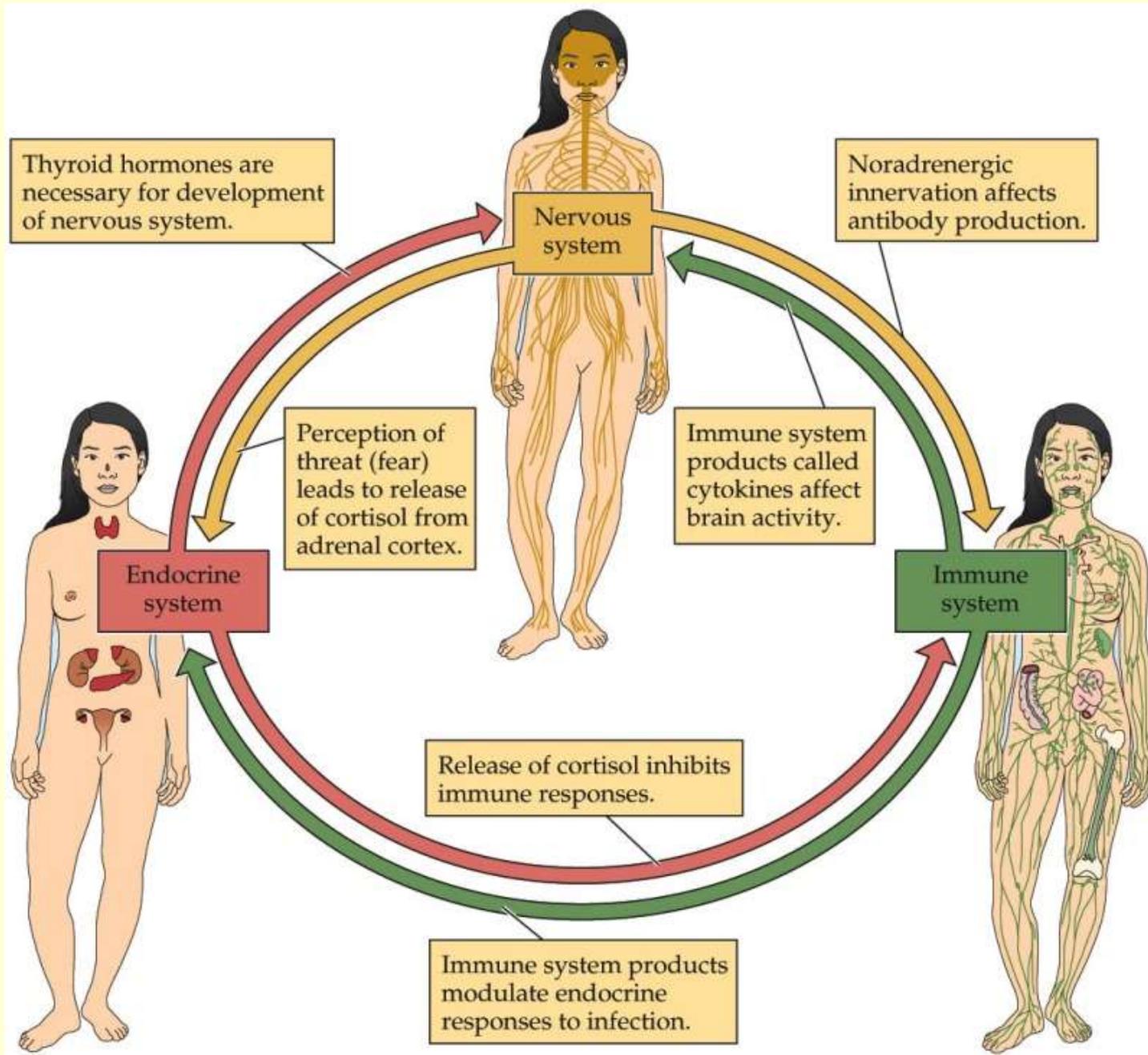


...et le **système endocrinien** avec toutes ses hormones

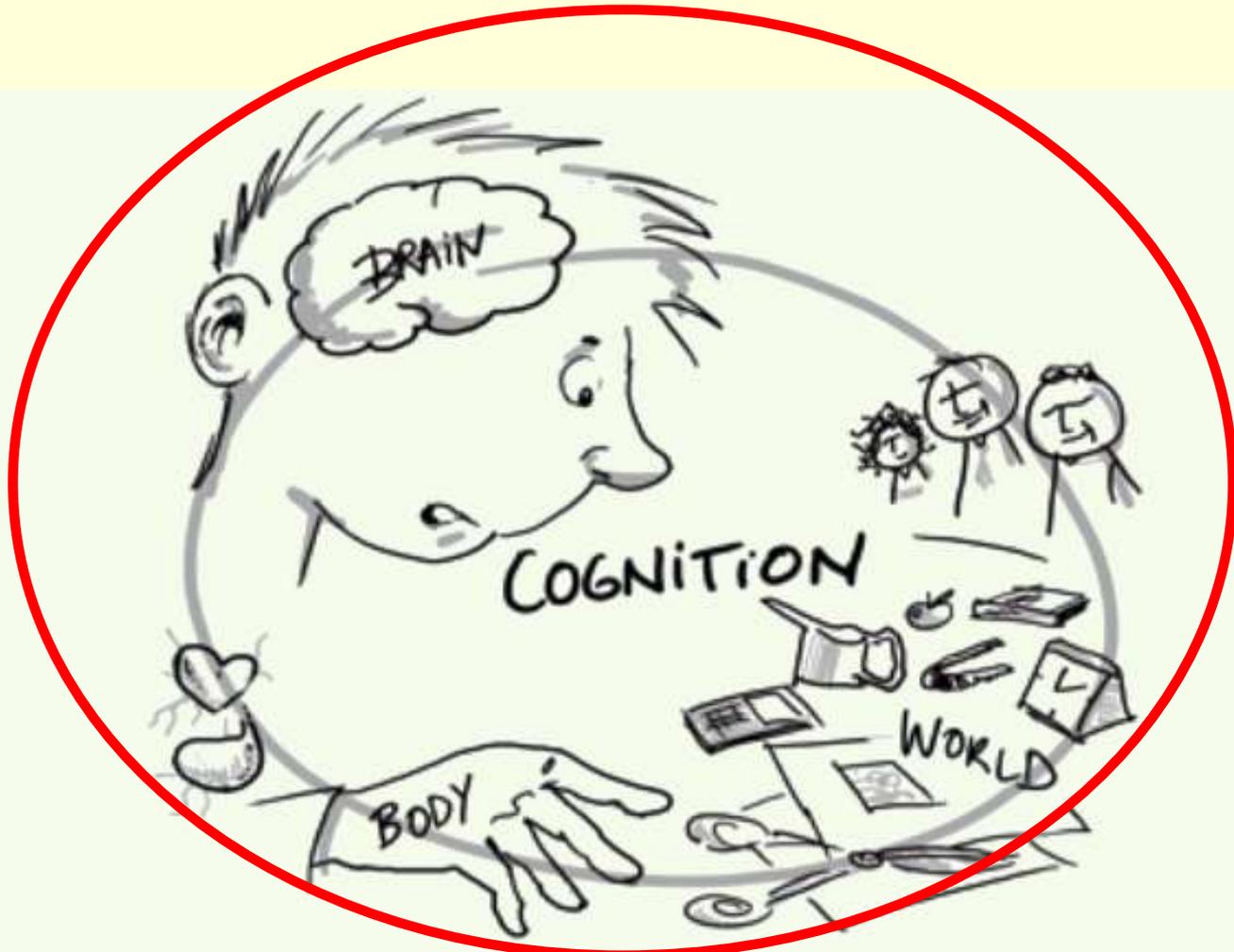
dirigées par l'hypophyse,

elle-même dirigée par l'hypothalamus...

...et toute la complémentarité entre les **systèmes nerveux, hormonal et Immunitaire.**



# Cerveau – Corps - Environnement





L'environnement physique...





...et l'environnement humain !

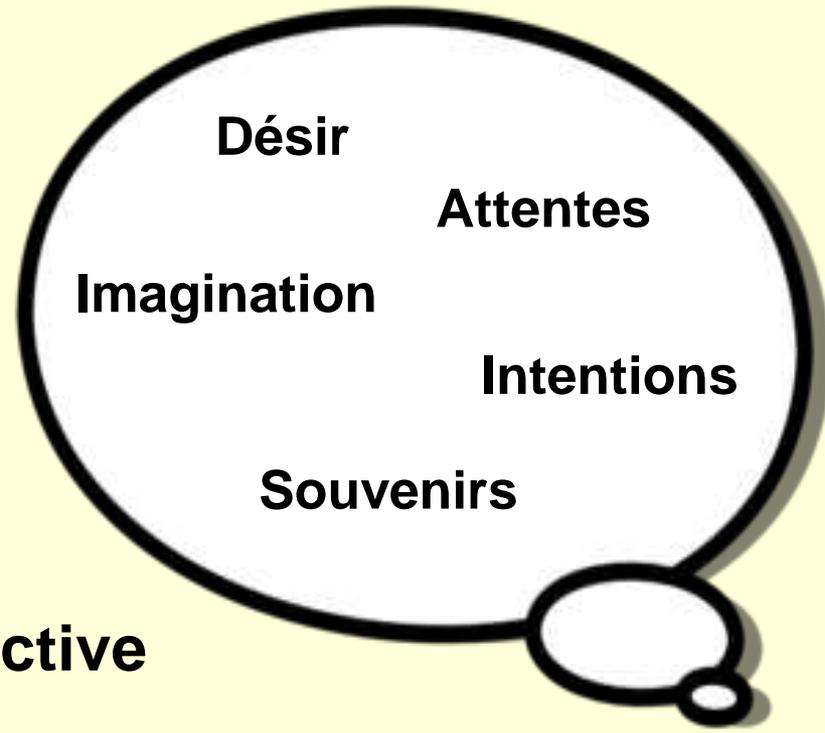




**Langage** : représentations symboliques communes permettant de coordonner nos actions



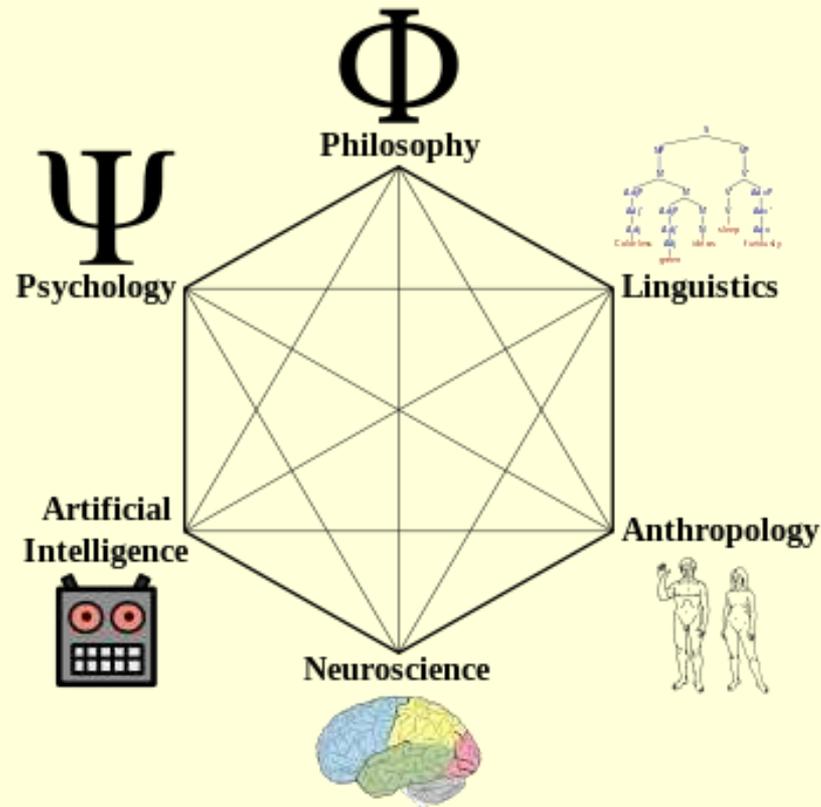
Ce langage tend aussi à « s'intérioriser » pour nommer des affects...



Cette **conscience subjective** est une caractéristique particulière de ces « corps-cerveau » vivants que les sciences cognitives vont tenter d'expliquer...



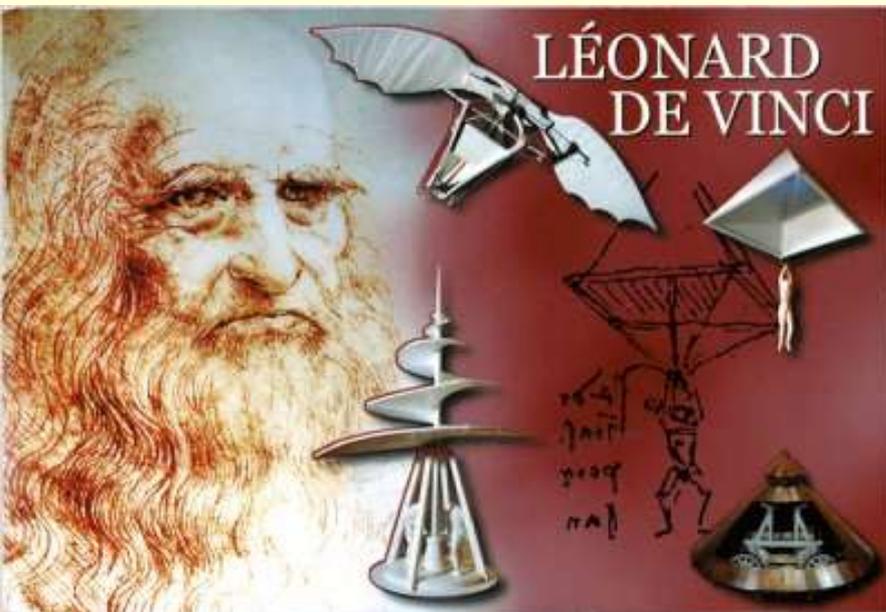
# Les « sciences cognitives »



**D'où viennent les disciplines qui vont nous accompagner durant ce cours et qui sont concernées par ce problème ?**

## Léonard de Vinci (1452 - 1519) :

La figure du « **savant universel** »

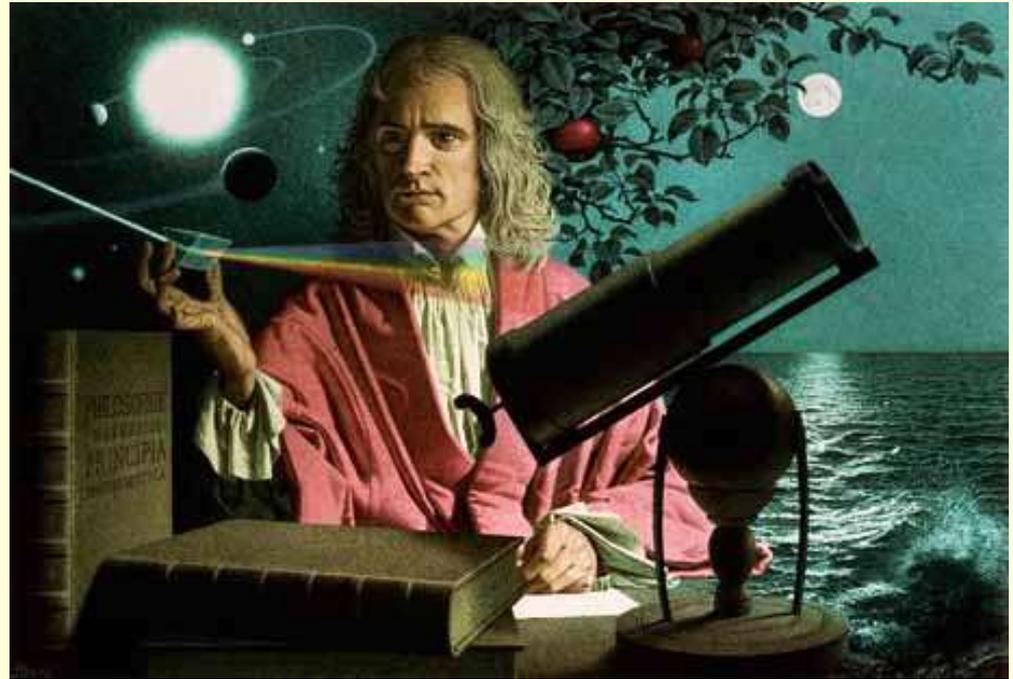


Peintre, sculpteur, orfèvre, musicien, architecte, physicien, astronome, géologue, géomètre, anatomiste, botaniste, alchimiste, inventeur visionnaire, ingénieur mécanicien, militaire, horloger, urbaniste, etc.



**René Descartes  
(1596-1650)**

Descartes avait encore cette ambition de tout embrasser, de tout expliquer...



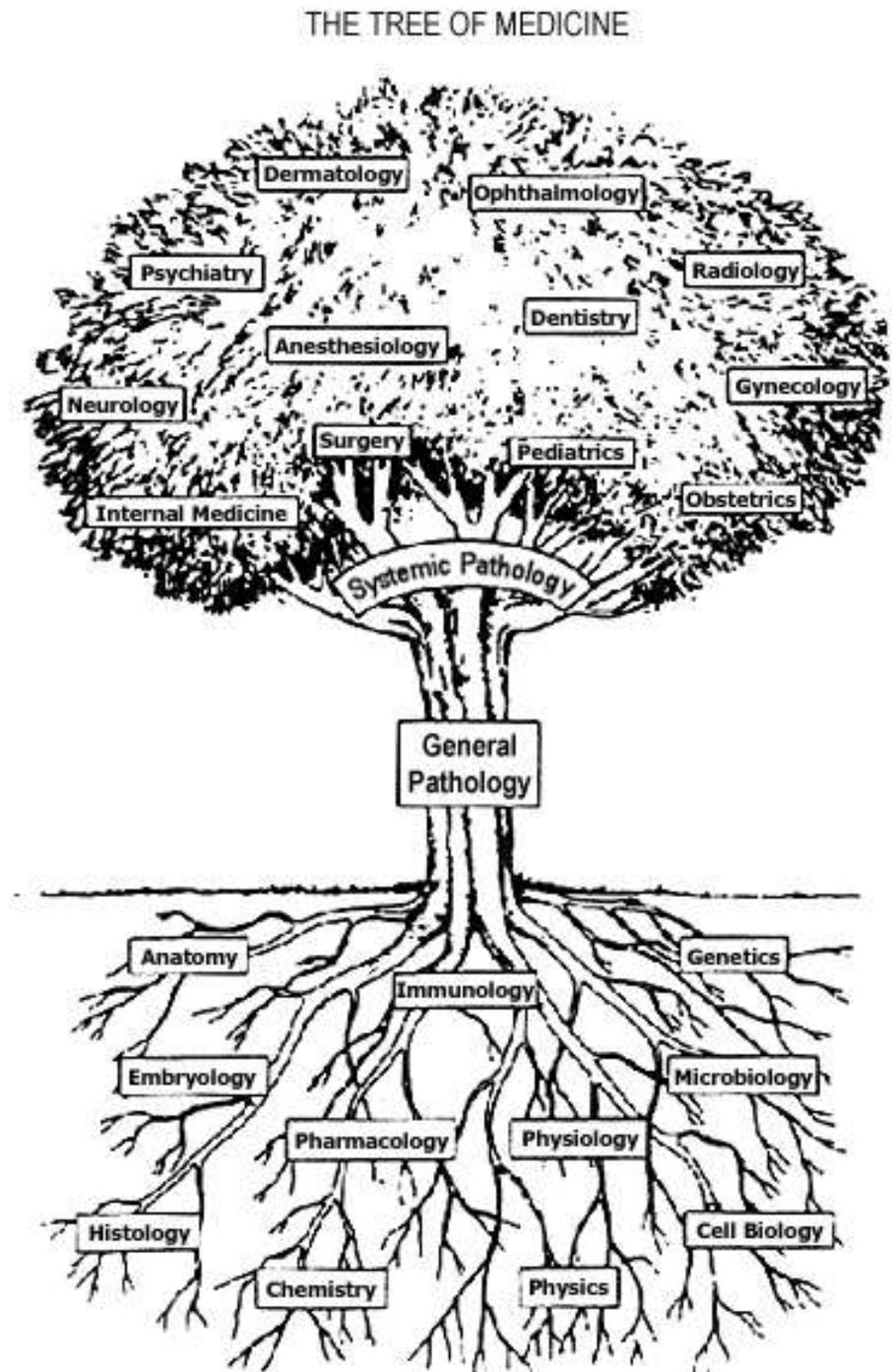
**Isaac Newton  
(1642-1727)**

C'est un peu à partir de Newton que des spécialités se sont créées en science;

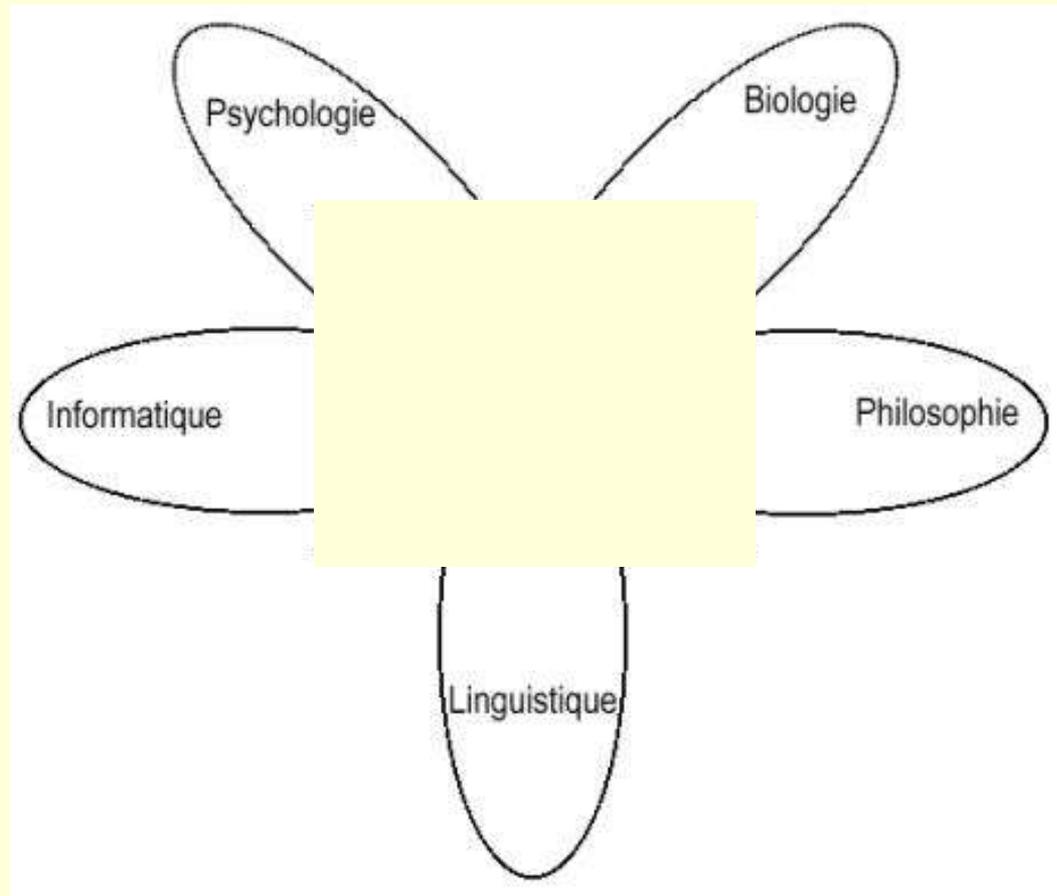
Newton dira que ses lois expliquent ceci ou cela, mais pas **tout** cela...

Puis, avec le **XXe siècle**,  
les disciplines scientifiques  
deviennent de plus en plus  
**spécialisées**.

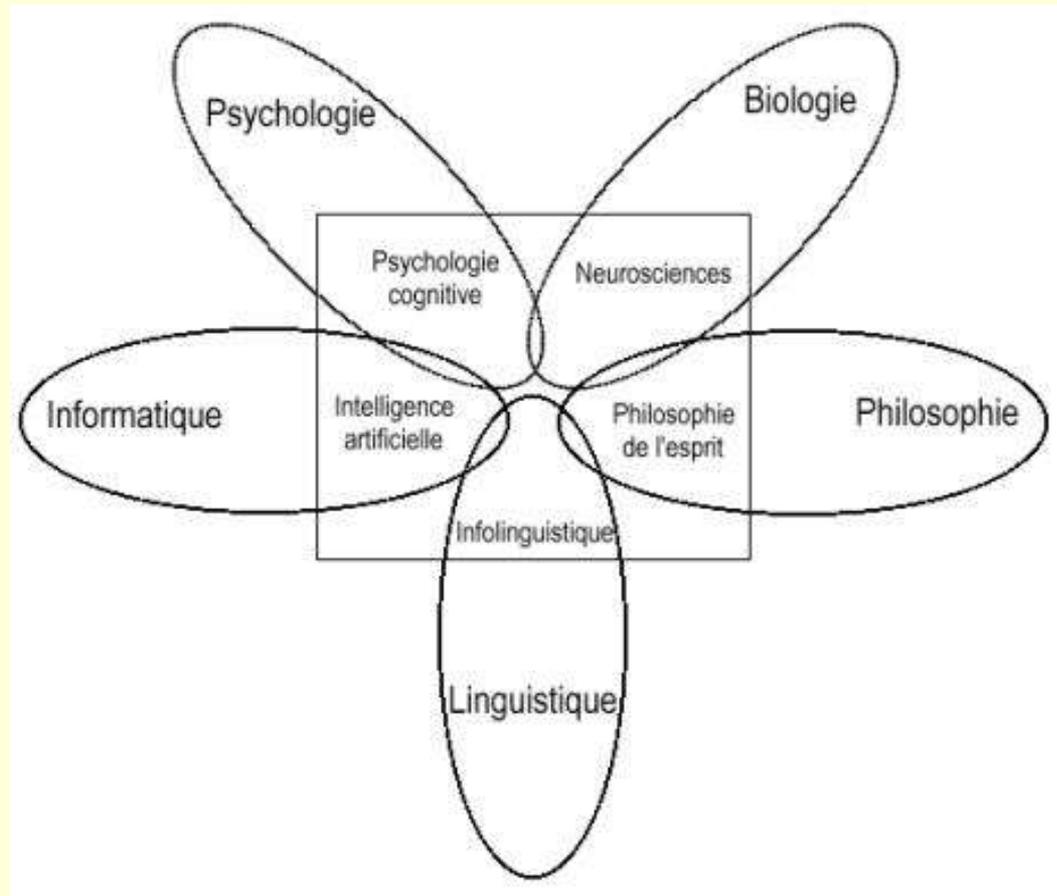
Et le « **spécialiste** » devient  
synonyme de bon scientifique...



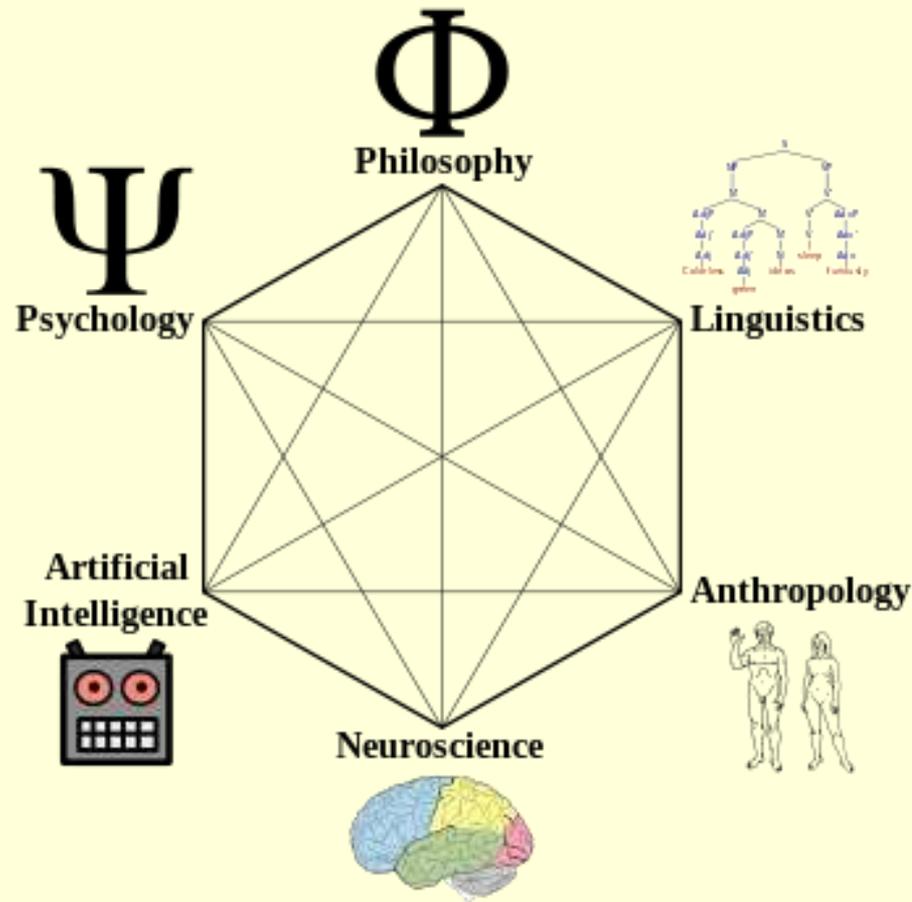
Et donc durant le XXe siècle on va passer de ceci...



...à cela, c'est-à-dire à des disciplines s'intéressant toutes au **fonctionnement de la pensée humaine et qui essaient de collaborer.**

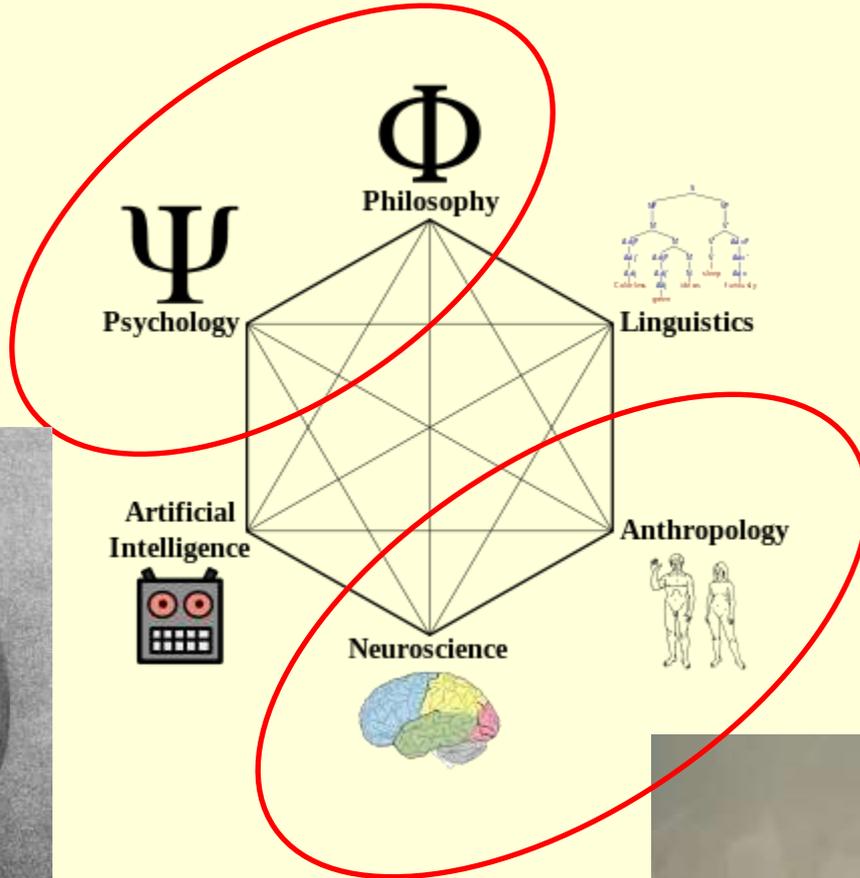


Et qui vont se constituer ce qu'on appelle les « **sciences cognitives** »

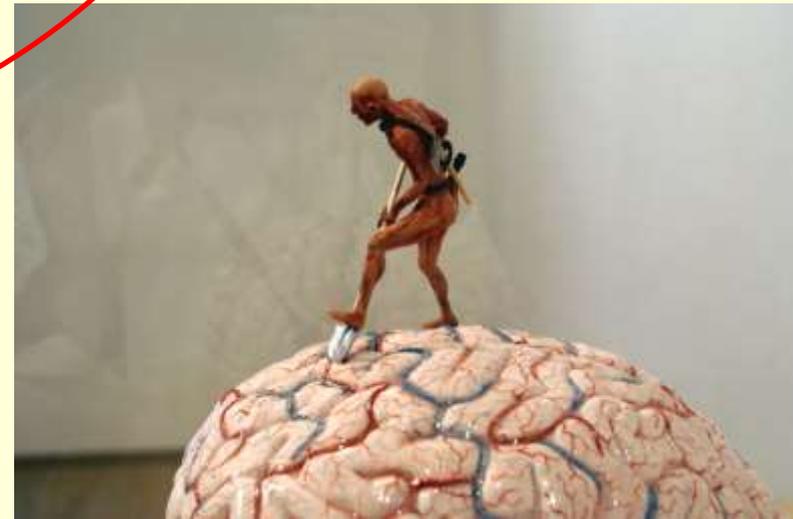


Dont certaines disciplines vont s'intéresser davantage à

l'aspect « subjectif »  
ou à la 1<sup>ère</sup> personne



l'aspect « objectif »  
ou à la 3<sup>e</sup> personne



Et ce n'est pas facile de concilier les deux...



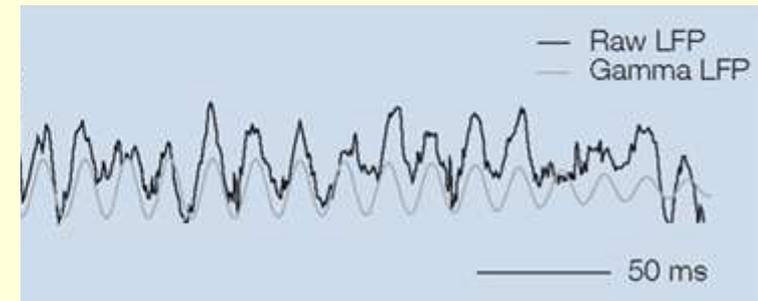
Le rouge que l'on ressent à la vue de cette pomme...

...c'est notre sentiment « subjectif » ou à la 1<sup>ère</sup> personne.

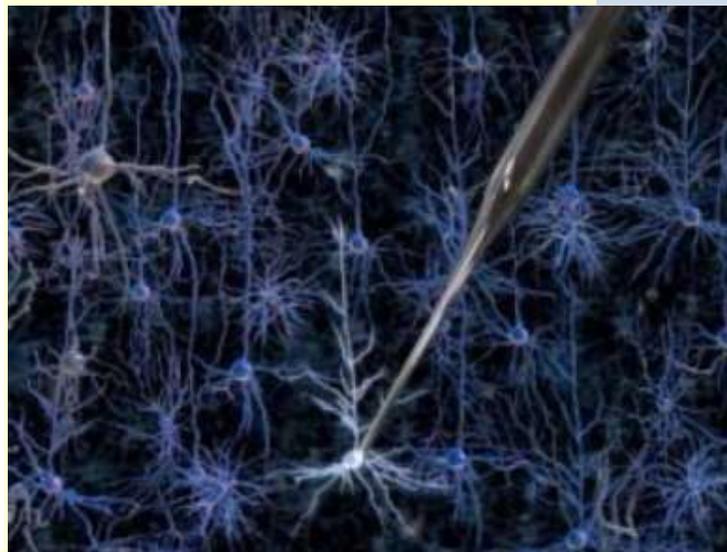
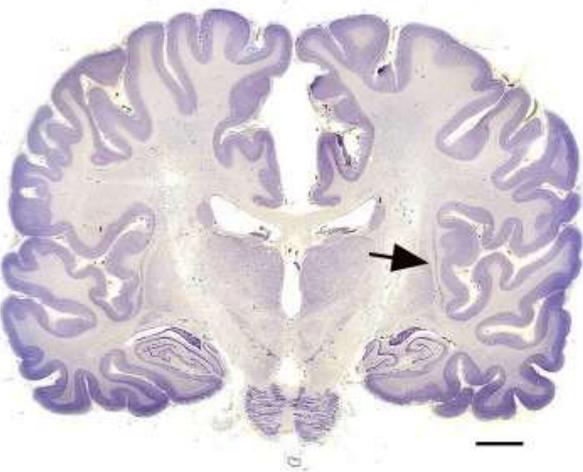


**Mais il est où le rouge dans notre cerveau ?**

Car si on regarde dans le cerveau, on voit juste des neurones qui sont parcourus par de l'activité électrique i.e. des ions qui traversent des membranes...!

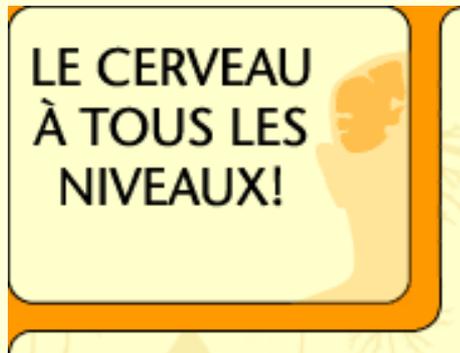


B



On ne peut pas comprendre ces phénomènes en les réduisant à un seul niveau d'organisation !

# Nous sommes fait de multiples **niveaux d'organisation**

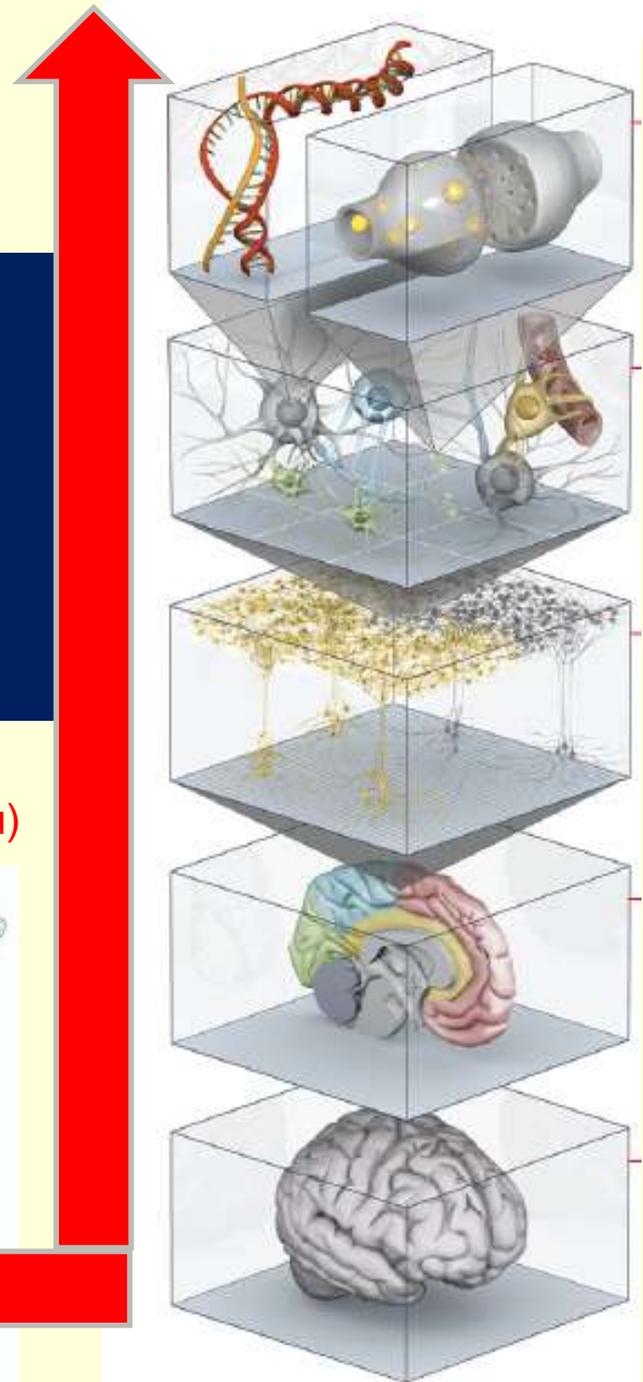
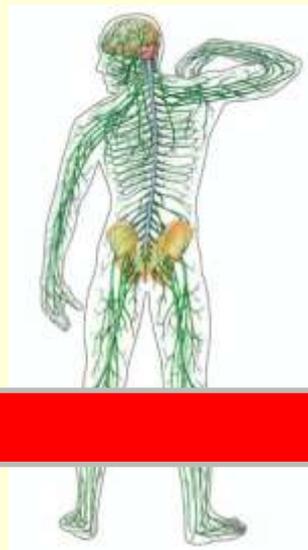


Le social  
(corps-cerveau-environnement)



Le concept  
fondamental  
du cours !

L'individu  
(corps-cerveau)



Cela fait des siècles que les philosophes se butent sur cette **dualité** « **objectif / subjectif** » qui peut prendre plusieurs étiquettes :

Esprit / corps (mind / body)

Sujet / objet (self / world)

Observateur / observé

Etc...

Et l'on va voir durant le cours, à la suite de penseur comme Francisco Varela, que la meilleure façon d'éviter de rester pris dans ces oppositions,

c'est de faire des **aller retour constants** entre un travail de catégorisation des états subjectif et des états neurophysiologiques.

## états subjectifs

Besoin

Douleur

Désir

Etc.

(sont des catégories élémentaires de la psychologie populaire (« folk-psychology ») : résultent d'une **réciprocité** entre ce qui est vécu et l'emploi public de ces termes)

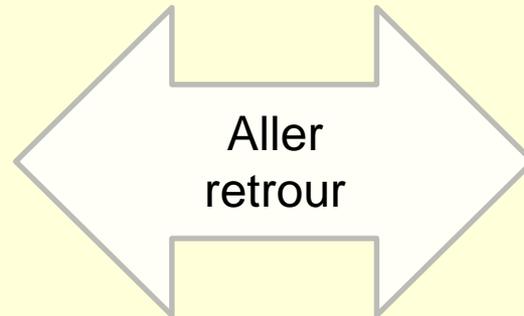
## états neurophysiologiques

Cortex visuel primaire

Réseau du mode par défaut

Synchronisation d'activité nerveuse

Etc.



C'est la même chose pour des catégories plus raffinées :

Attention focalisée versus  
attention ouverte  
en méditation

Dépolarisation membranaire  
amenant une excitabilité accrue  
dans tels neurones du cortex

états subjectifs

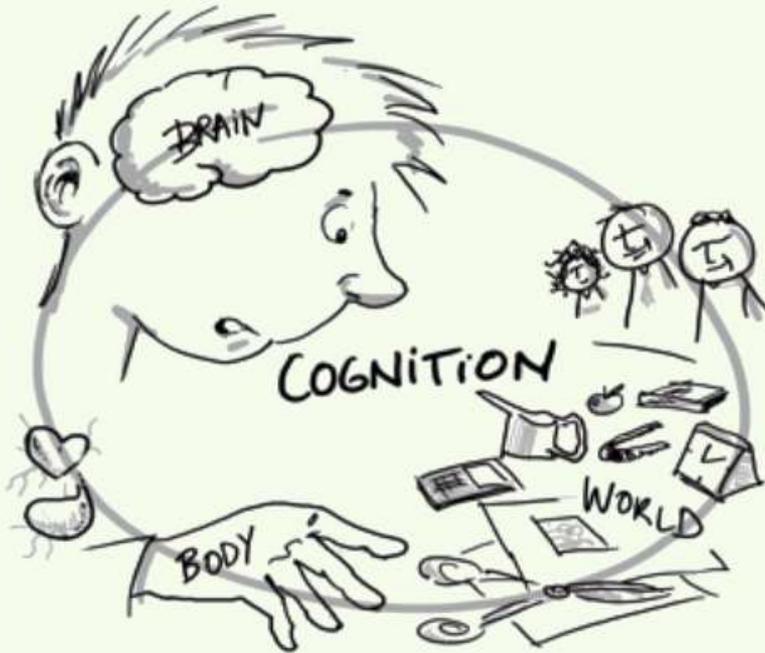
états neurophysiologiques

Qu'en est-il des thèmes soulevés tantôt par rapport à ces catégories ?



# Cours 1: Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)

A- Vue d'ensemble et  
niveaux d'organisation  
(plus courte)



B- Du Big Bang aux primates  
(- 13,7 milliards d'années  
à - 65 millions d'années)  
(plus longue)



Repartons du problème de la conscience subjective.

Désir

Attentes

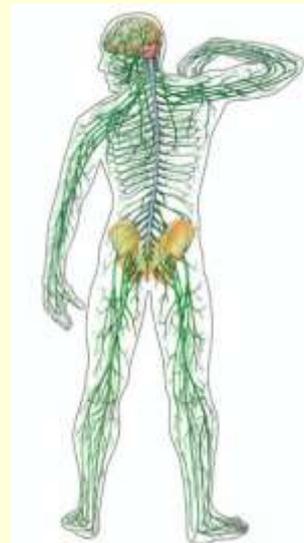
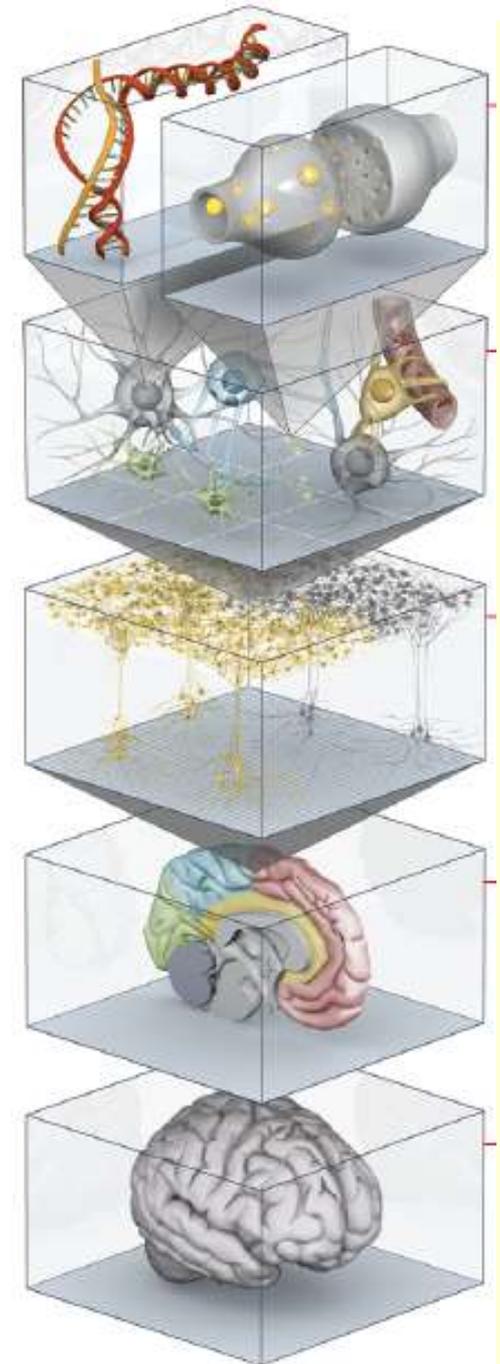
Imagination

Intentions

Souvenirs

C'est grâce à tous ces niveaux qu'elle émerge.

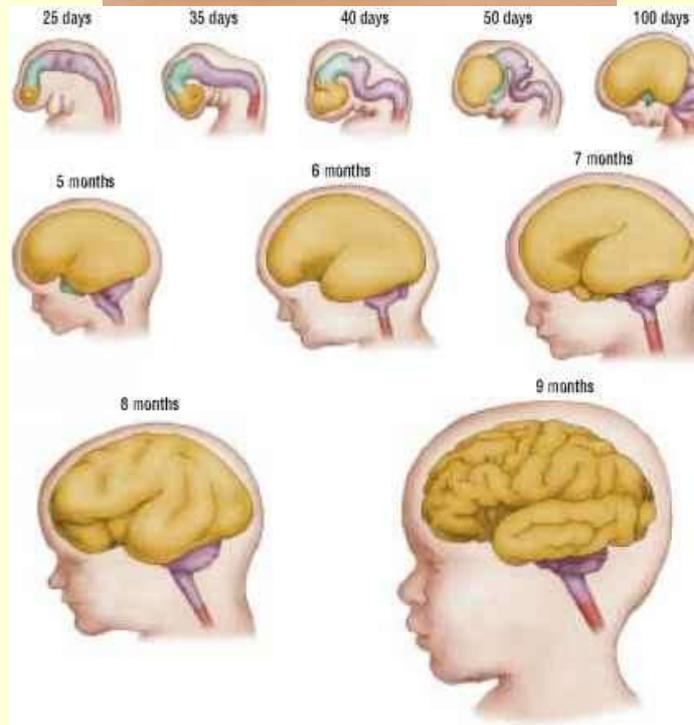
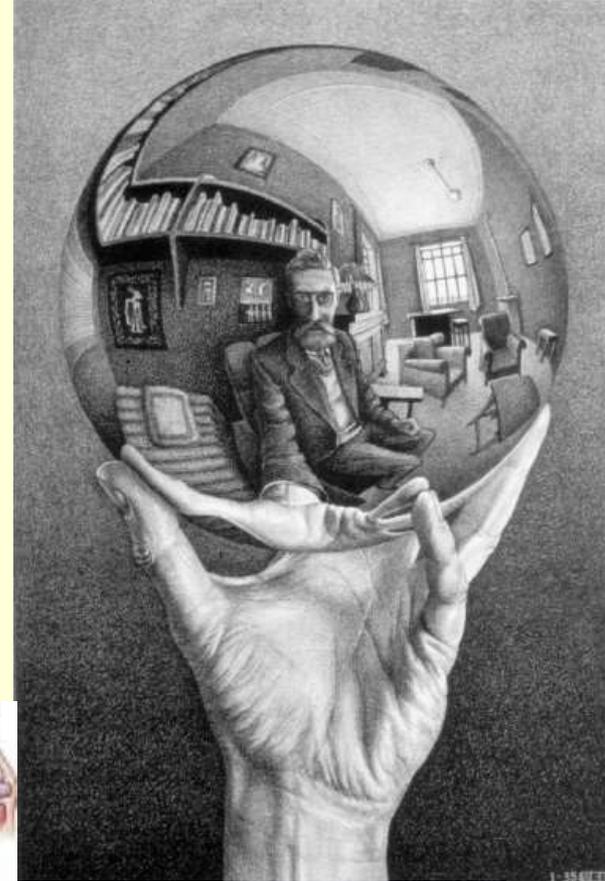
Mais elle commence quand ?

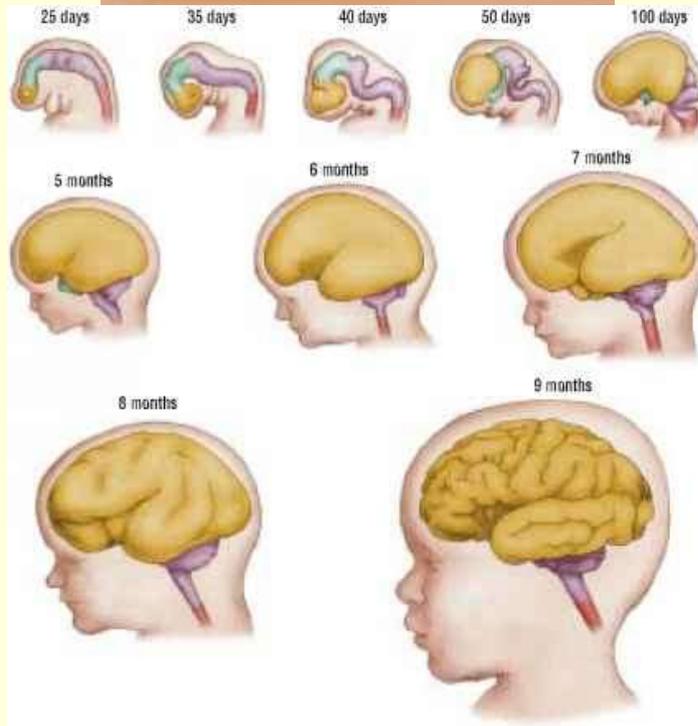
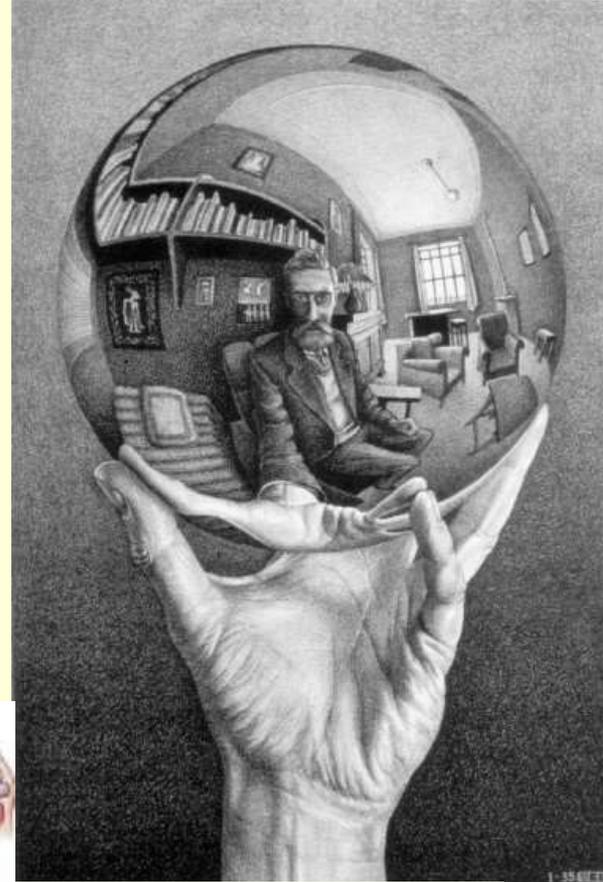


Difficile d'avoir accès  
à sa subjectivité...

...mais pas  
impossible par des  
protocoles astucieux

et l'on peut faire des  
corrélations avec le  
cerveau en  
développement.

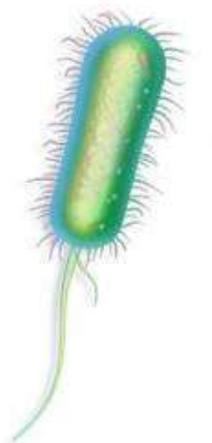
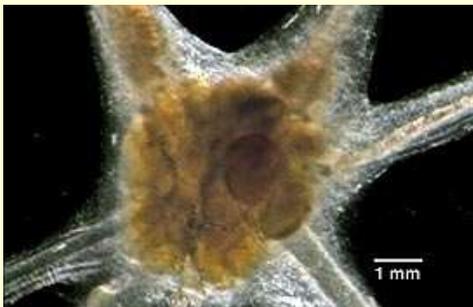
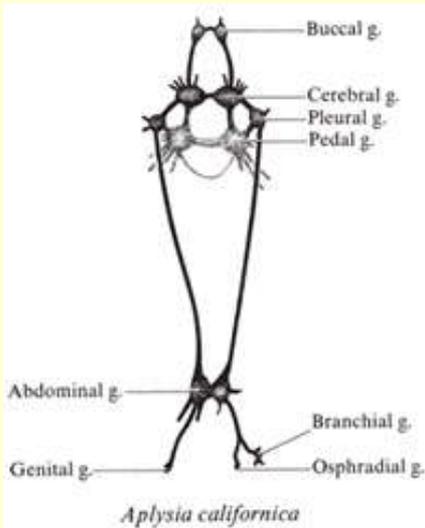






## Malcolm MacIver: How Sentience Changed After Fish Invaded Land 385 Ma

[https://www.youtube.com/watch?v=HI7fXIP\\_mjo&t=29s&index=39&list=PLTJcZPOXChRSWlzUa8mZ5hujZoLGBfyV0](https://www.youtube.com/watch?v=HI7fXIP_mjo&t=29s&index=39&list=PLTJcZPOXChRSWlzUa8mZ5hujZoLGBfyV0)



# Linguistic Bodies

## The Continuity between Life and Language

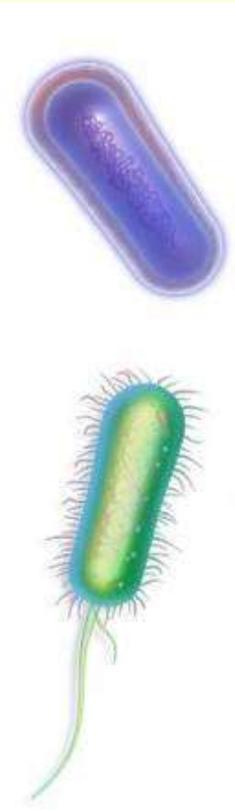
By Ezequiel A. Di Paolo, Elena Clare Cuffari and  
Hanne De Jaegher

A novel theoretical framework for an embodied, non-representational approach to language that extends and deepens enactive theory, bridging the gap between sensorimotor skills and language.

<https://mitpress.mit.edu/books/linguistic-bodies>

**2018**

Il va falloir **reculer dans le temps**  
pour essayer de comprendre où commence le « mind » !





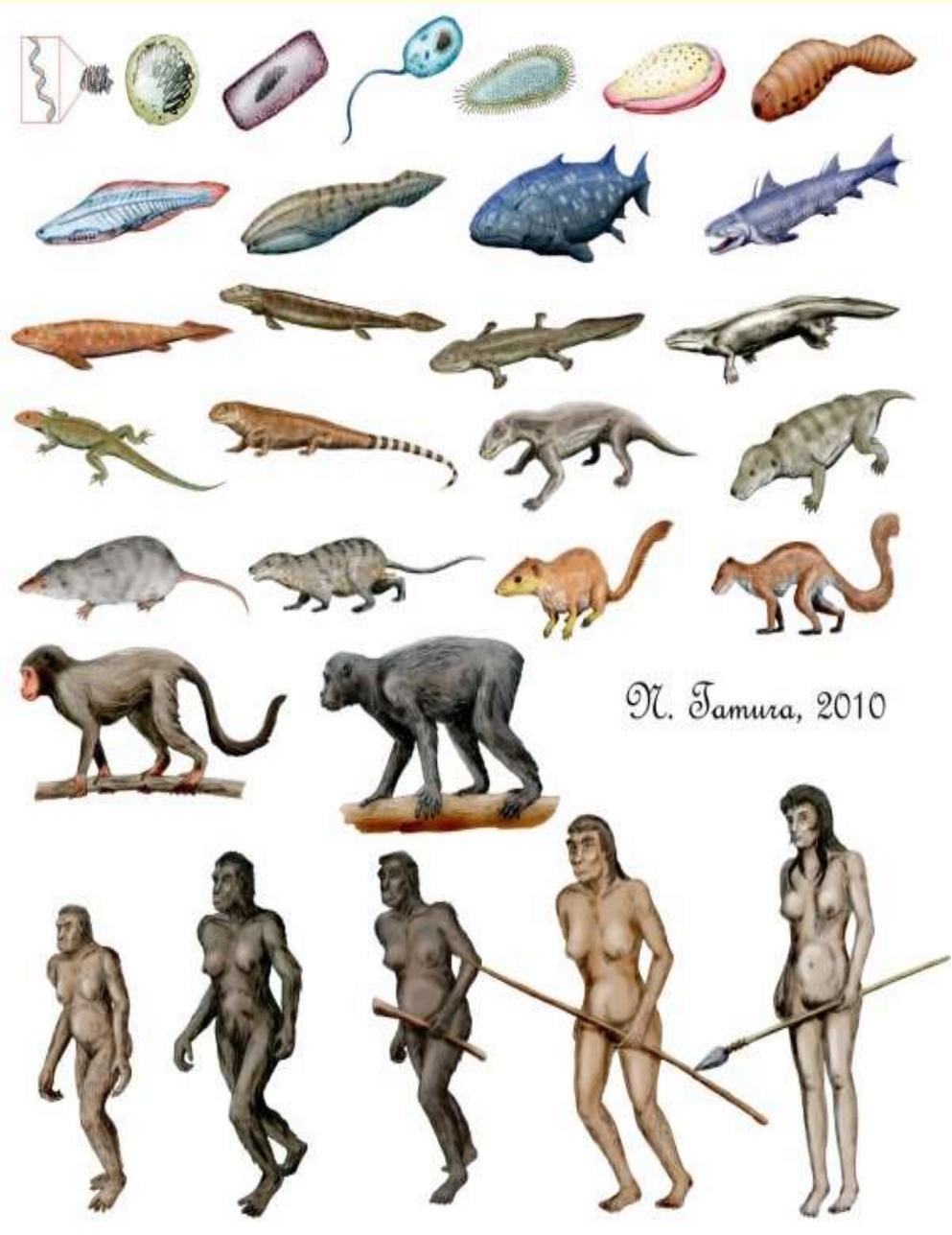


Live from the Flight Deck | golfcharlie232





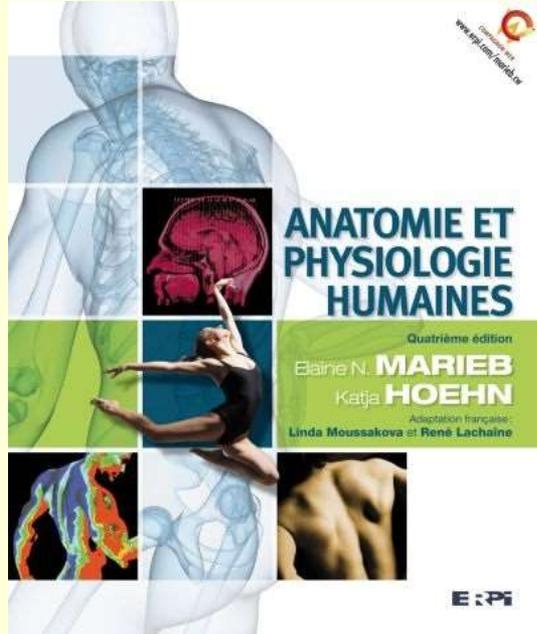




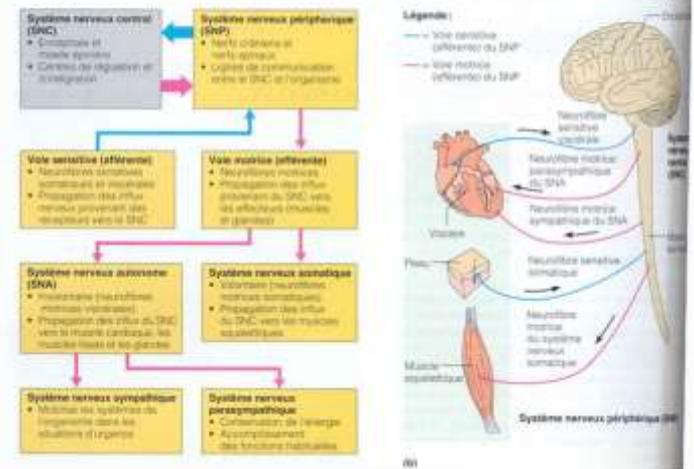
« Rien en biologie n'a de sens, si ce n'est à la lumière de l'évolution »

- Theodosius Dobzhansky (1900-1975)





# Organisation du système nerveux



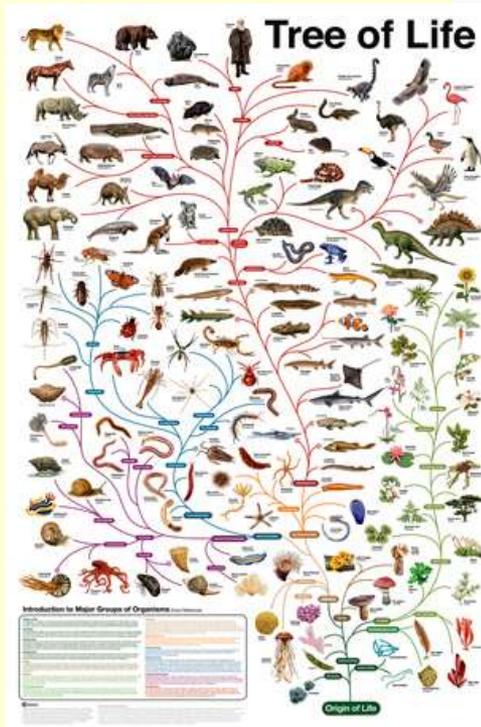
Marieb, 1999

Parce qu'essayer de comprendre le cerveau humain actuel en présentant son **organisation** et ses **fonctions**

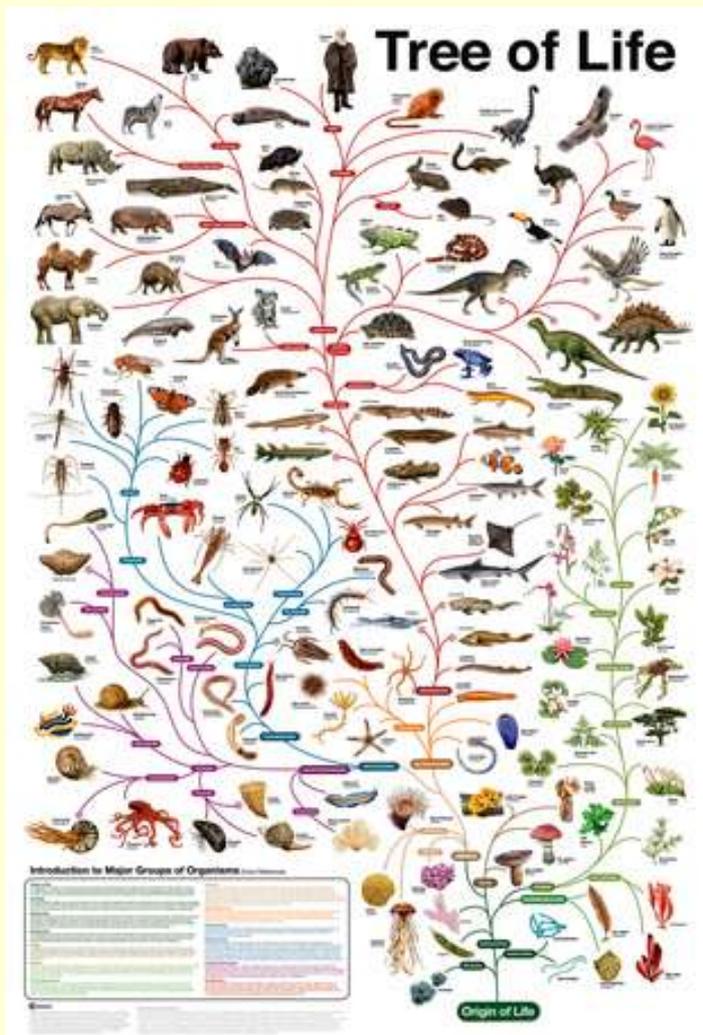
en faisant pratiquement abstraction de sa longue **histoire évolutive**

ne peut déboucher que sur une compréhension **superficielle** de celui-ci.

(on verra pourquoi...)



Pour essayer de comprendre le cerveau, il faut donc d'abord se pencher ce qu'est **la vie** elle-même...



Et pour être sûr de ne rien manquer...





...on va reculer très loin dans le passé... ;-)





« L'histoire de l'Univers, c'est comment ces quarks et ces électrons sont devenus vous-mêmes.



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



# Croissance de complexité

(ce qui ne veut pas dire que l'humain en soit la finalité !)

Vous êtes nés il y a  
13,7 milliards  
d'années

**Évolution cosmique, chimique et biologique**



(Crédit : modifié de Robert Lamontagne)

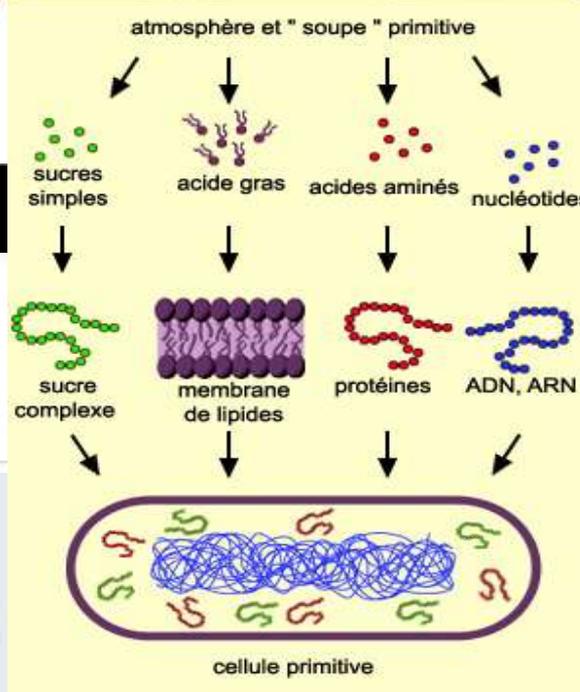
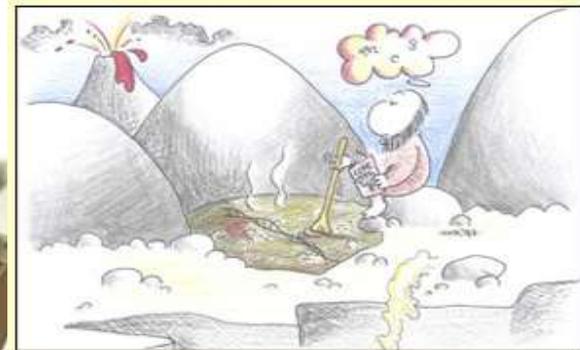
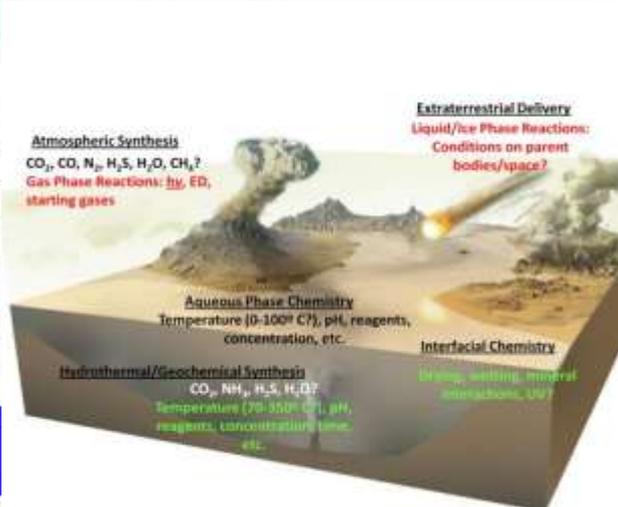


# Croissance de complexité

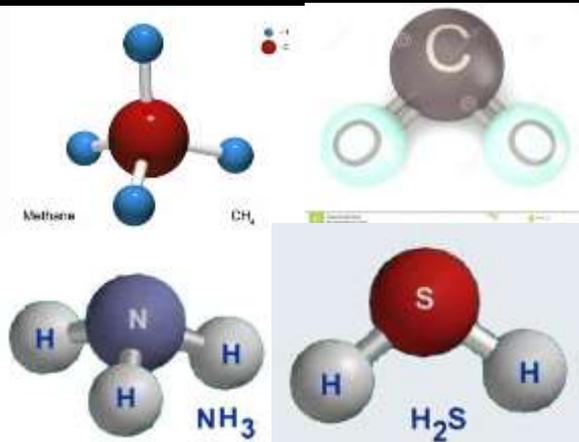
(ce qui ne veut pas dire que l'humain en soit la finalité !)



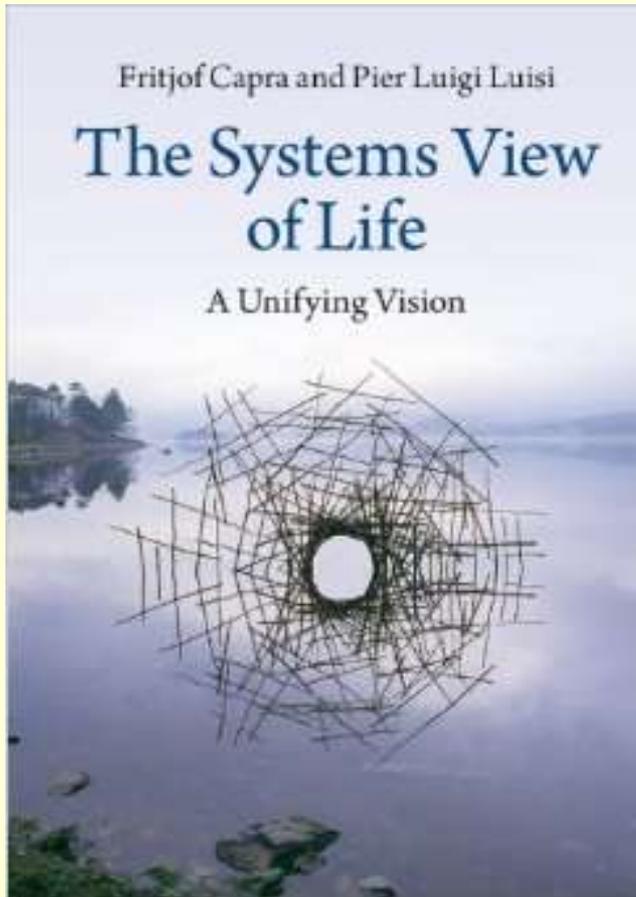
## Tableau Périodique des Éléments



## Évolution cosmique, chimique



(Crédit : modifié de Robert Lamont)



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

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

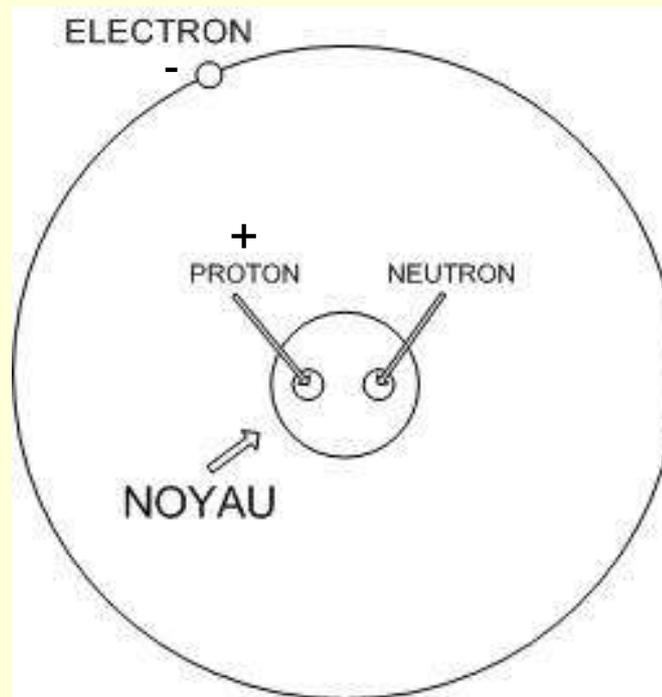


- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?



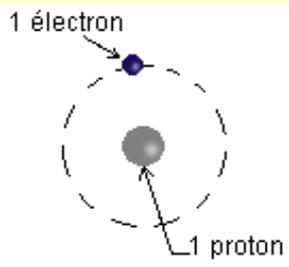
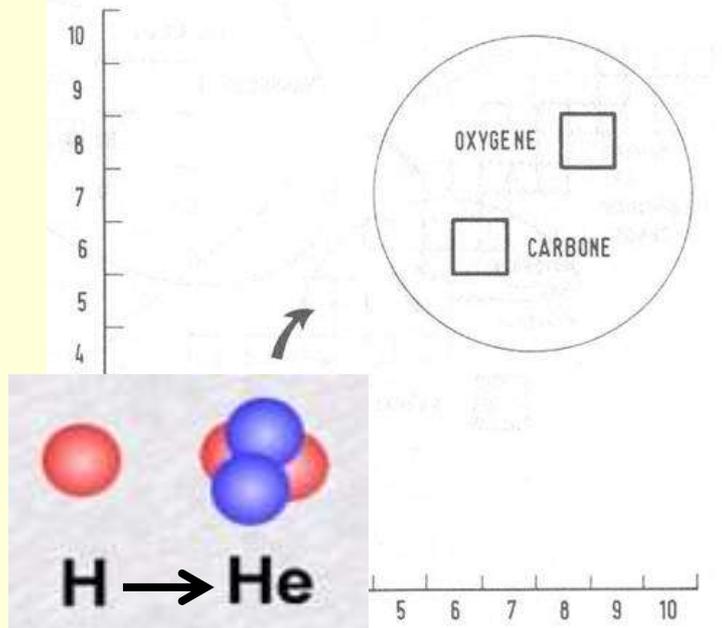
Tout est fait  
d'atomes !



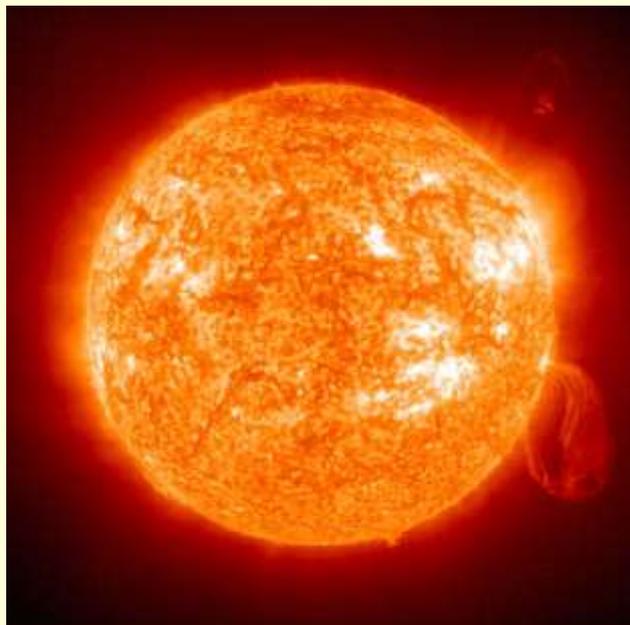


**L'atome** est constitué d'un noyau concentrant plus de 99,9 % de sa masse autour duquel se distribuent des électrons pour former un nuage 100 000 fois plus étendu que le noyau lui-même (donc schéma pas à l'échelle ici !).

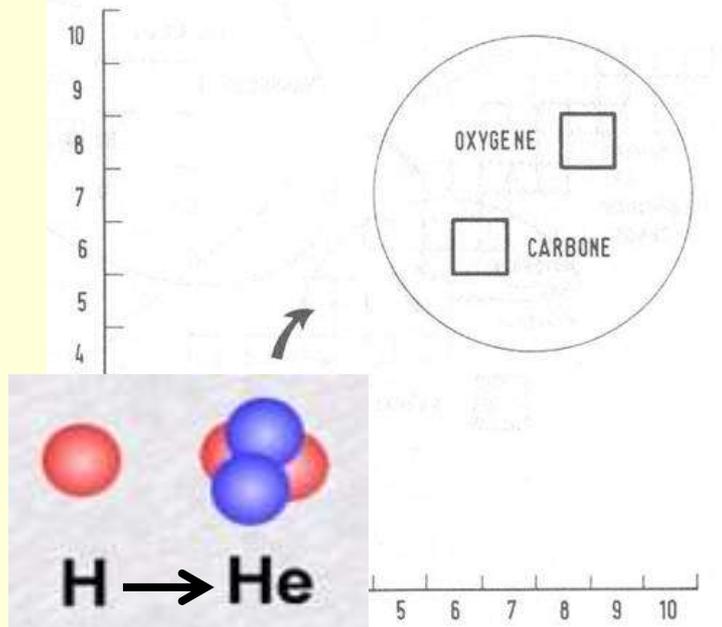
# Combustion de l'hélium



Hydrogène



# Combustion de l'hélium



**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 IA	New Original																18 VIIIA	
1 <b>H</b> Hydrogène 1.00794																	2 <b>He</b> Hélium 4.002602	
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Béryllium 9.012182																	10 <b>Ne</b> Néon 20.1797
11 <b>Na</b> Sodium 22.989770	12 <b>Mg</b> Magnésium 24.3050	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 <b>Ar</b> Argon 39.948	
19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955910	22 <b>Ti</b> Titane 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chrome 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganèse 54.938049	26 <b>Fe</b> Fer 55.8457	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933200	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Cuivre 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.409	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160	34 <b>Se</b> Sélénium 78.96	35 <b>Br</b> Brome 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798	
37 <b>Rb</b> Rubidium 87.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdène 95.94	43 <b>Tc</b> Technétium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthénium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Argent 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Étain 118.710	51 <b>Sb</b> Antimoine 121.760	52 <b>Te</b> Tellure 127.60	53 <b>I</b> Iode 126.90447	54 <b>Xe</b> Xénon 131.293	
55 <b>Cs</b> Césium 132.90545	56 <b>Ba</b> Baryum 137.327	57 to 71																
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89 to 103																
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/>

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.

57 <b>La</b> Lanthane 138.9055	58 <b>Ce</b> Cérium 140.116	59 <b>Pr</b> Praséodyme 140.90766	60 <b>Nd</b> Néodyme 144.24	61 <b>Pm</b> Prométhium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.92534	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93032	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93421	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.04	71 <b>Lu</b> Lutécium 174.967
89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232.0381	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.03588	92 <b>U</b> Uranium 238.02891	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Américium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkélium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobélium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (262)

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



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

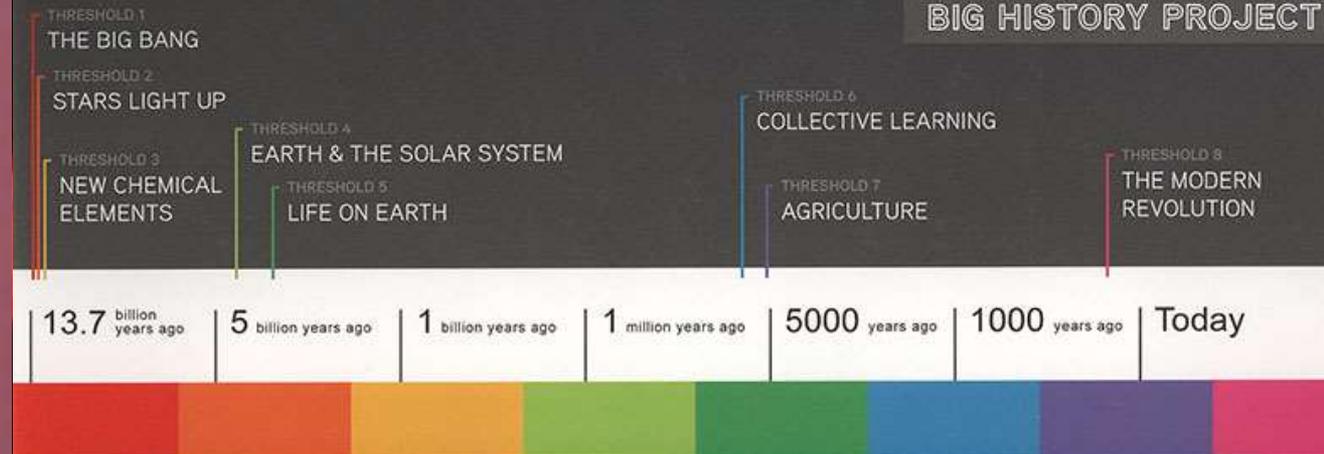
Hubert Reeves  
**PATIENCE  
DANS L'AZUR**

L'ÉVOLUTION COSMIQUE

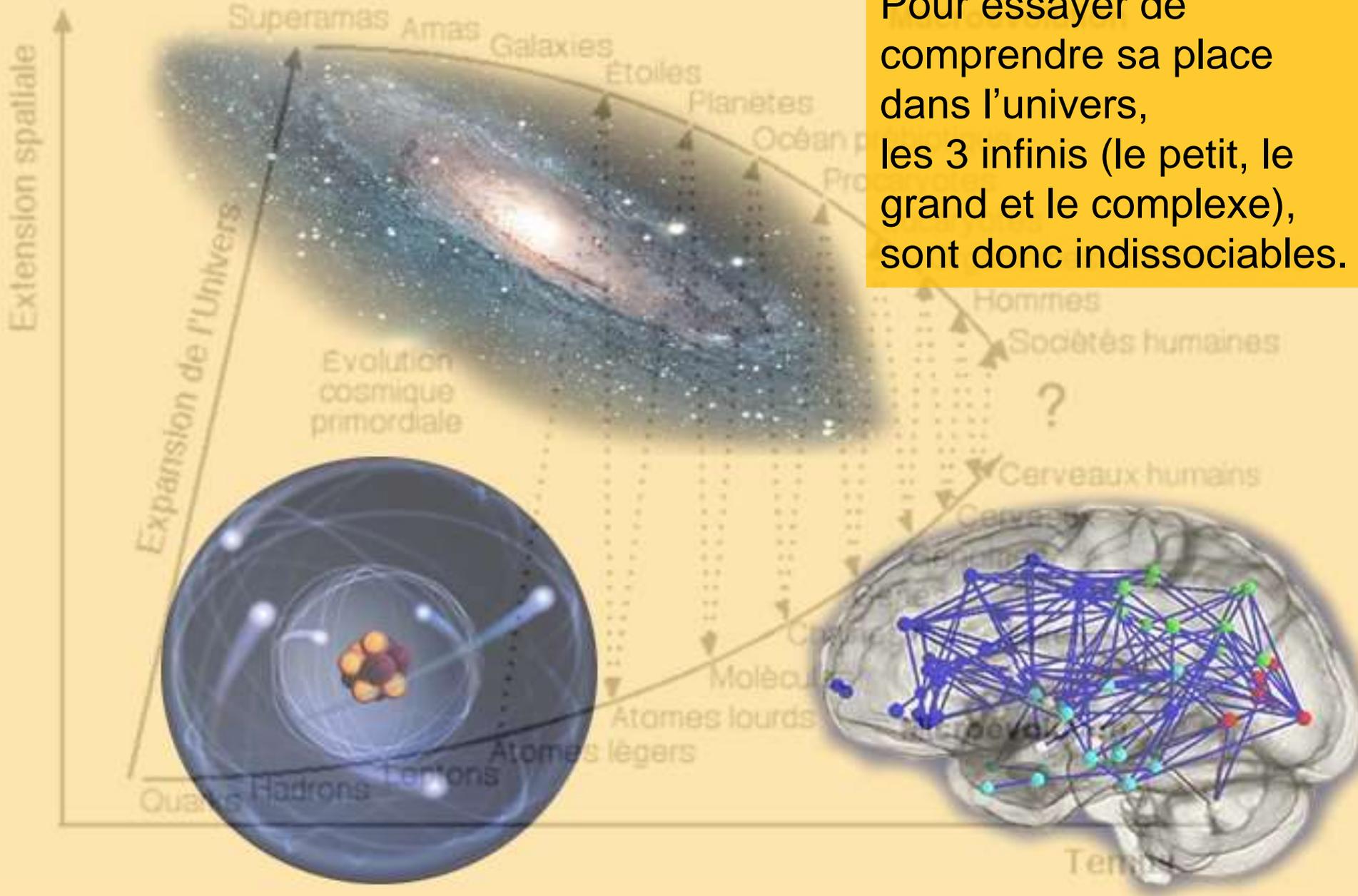


QUÉBEC SCIENCE  
ÉDITEUR

(1981)

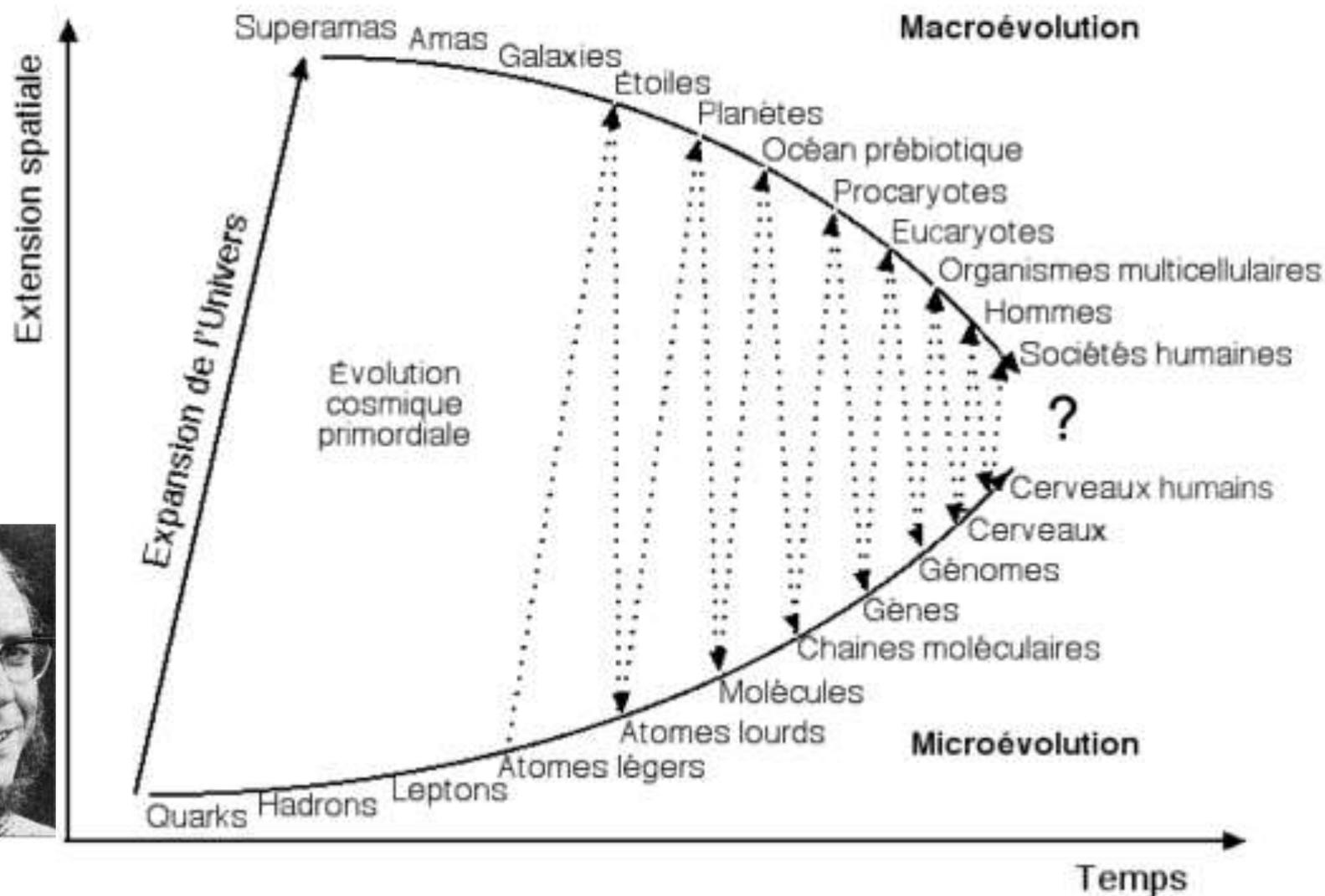


Pour essayer de comprendre sa place dans l'univers, les 3 infinis (le petit, le grand et le complexe), sont donc indissociables.

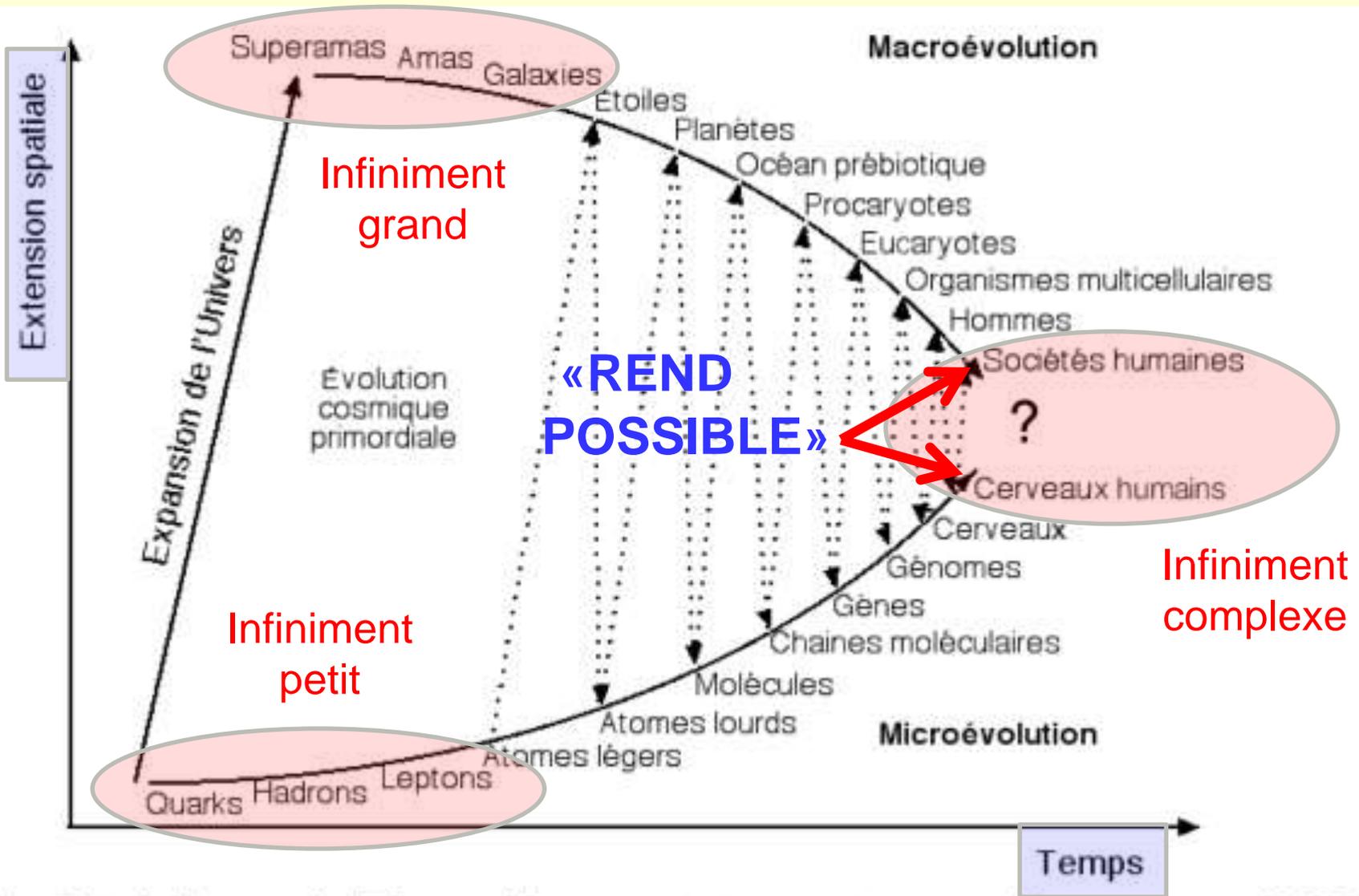




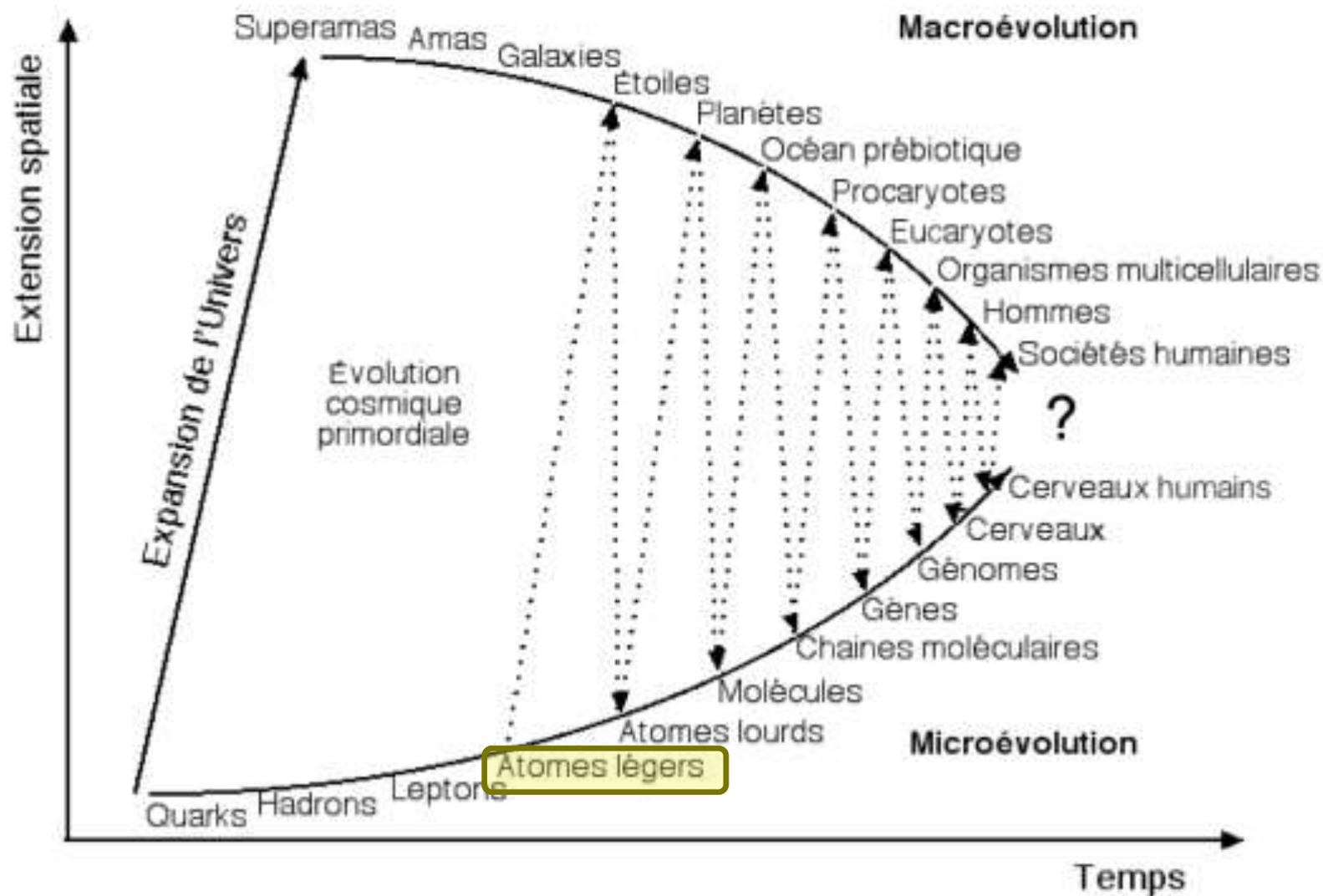
(1929 - 1980)



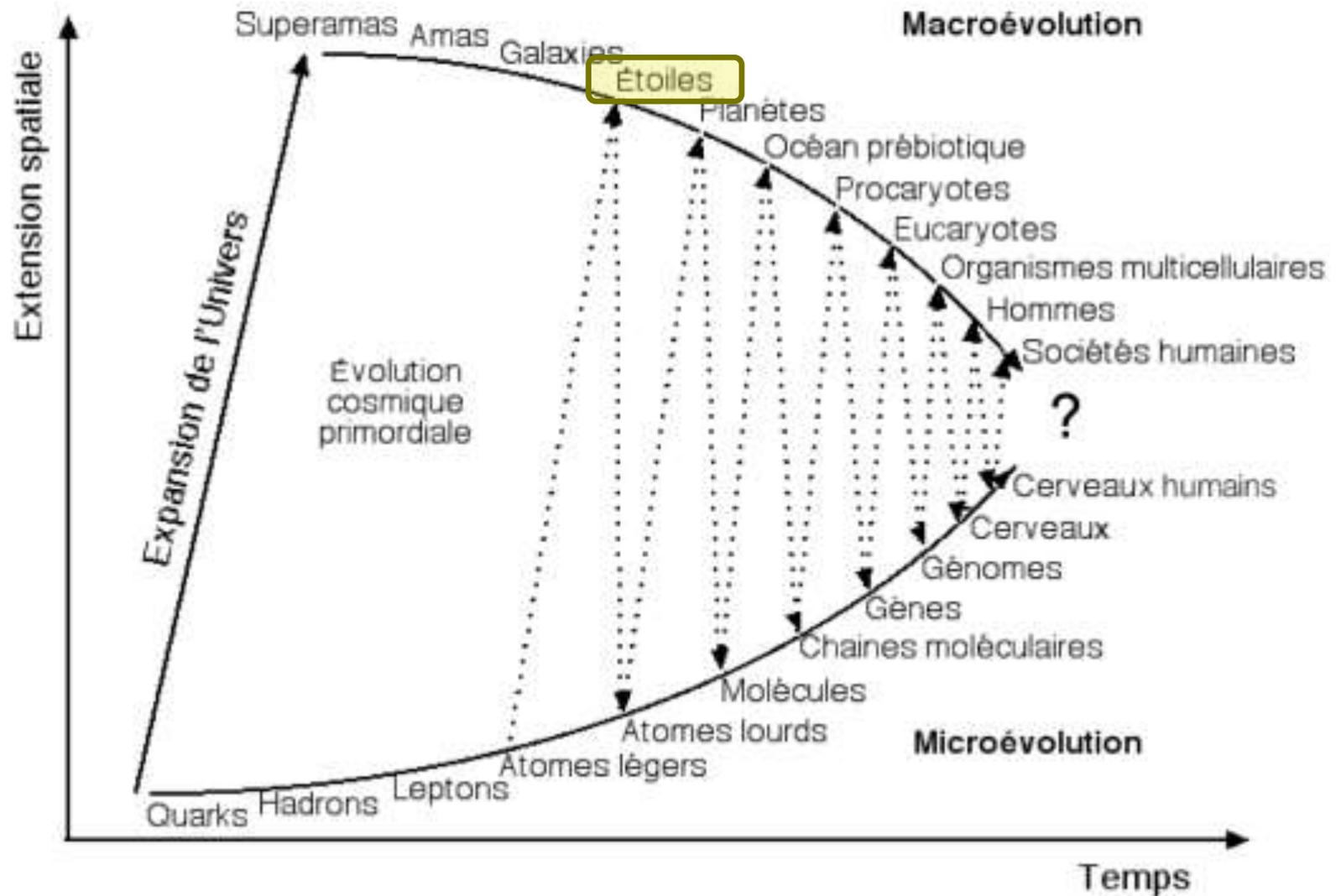
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



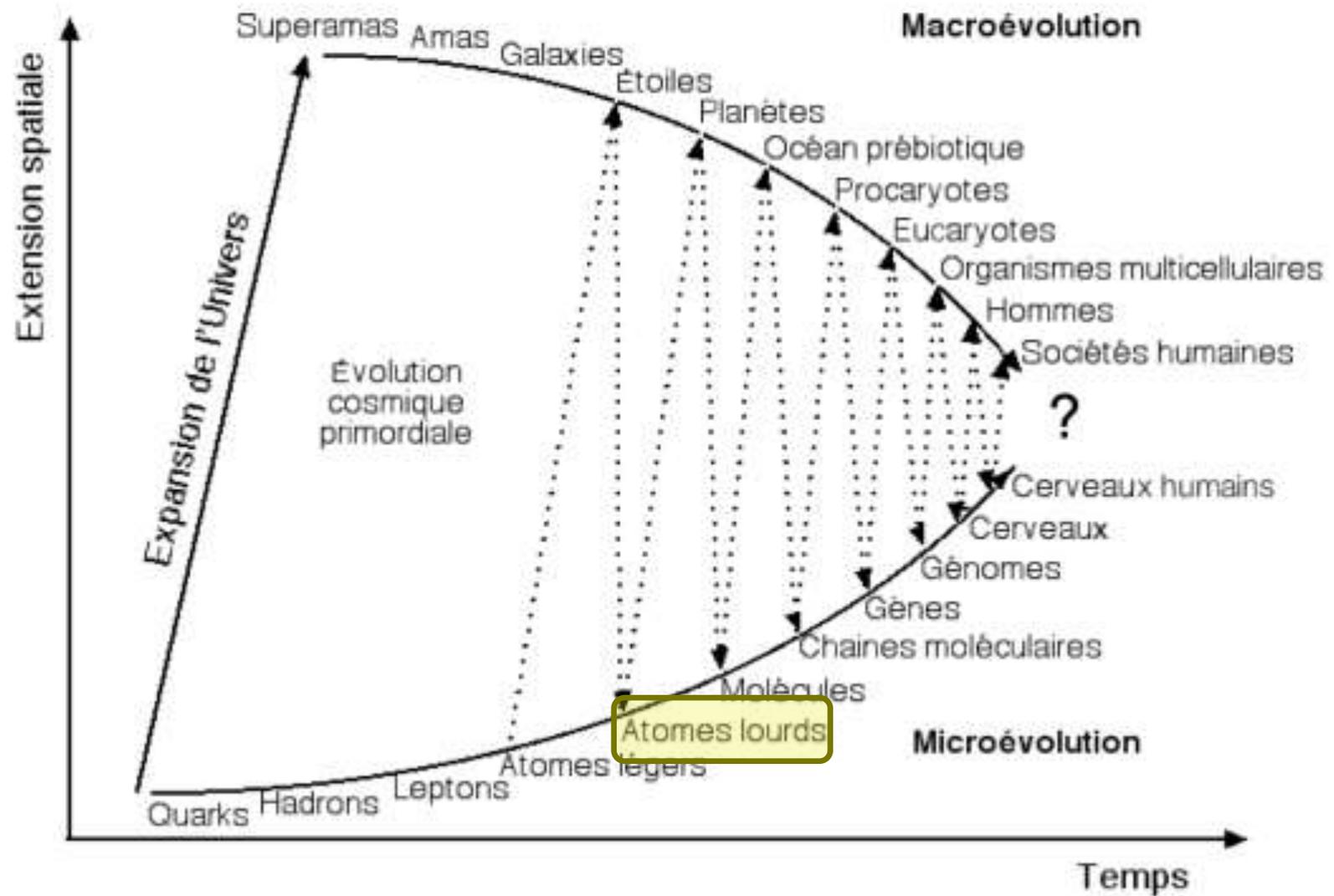
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



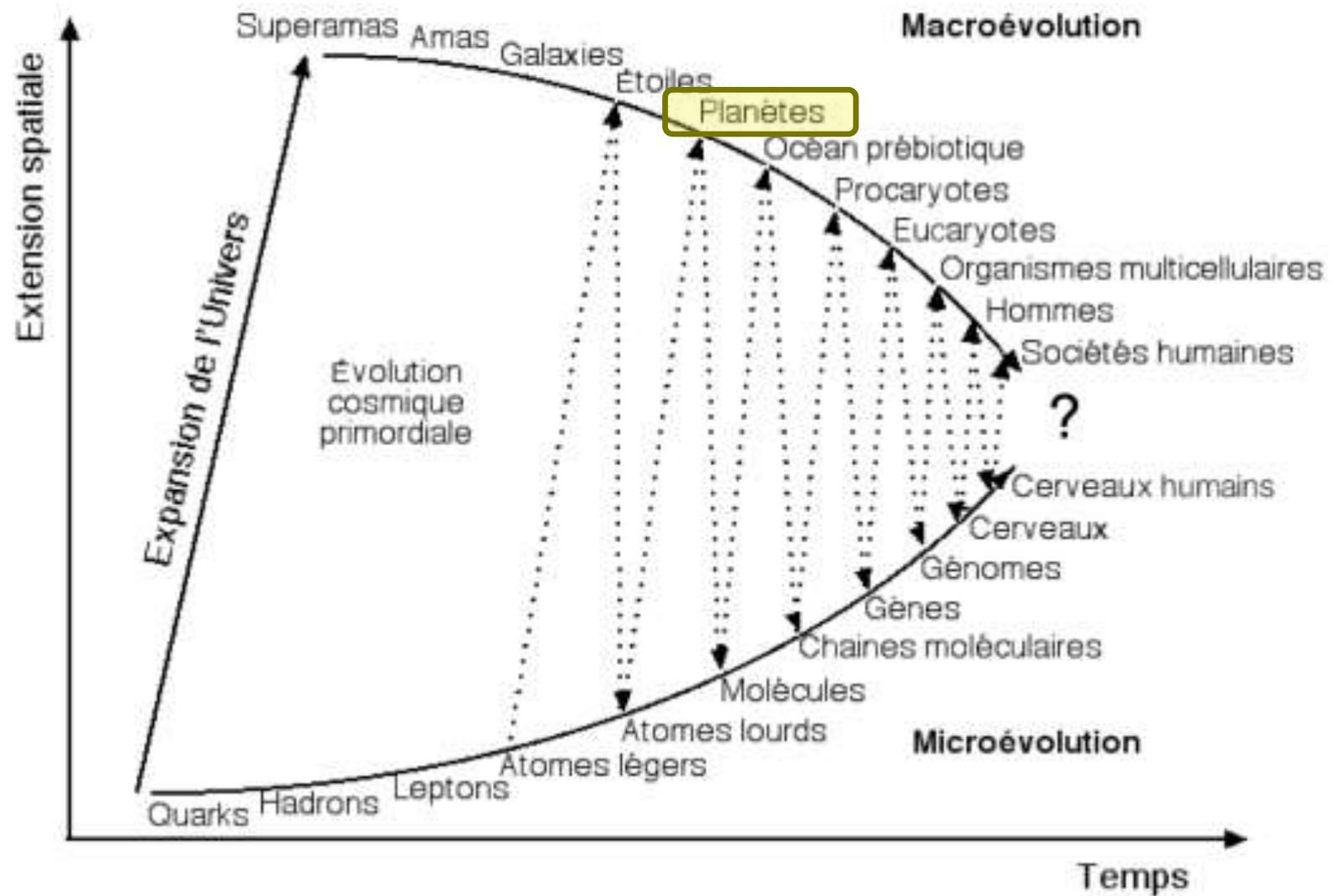
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



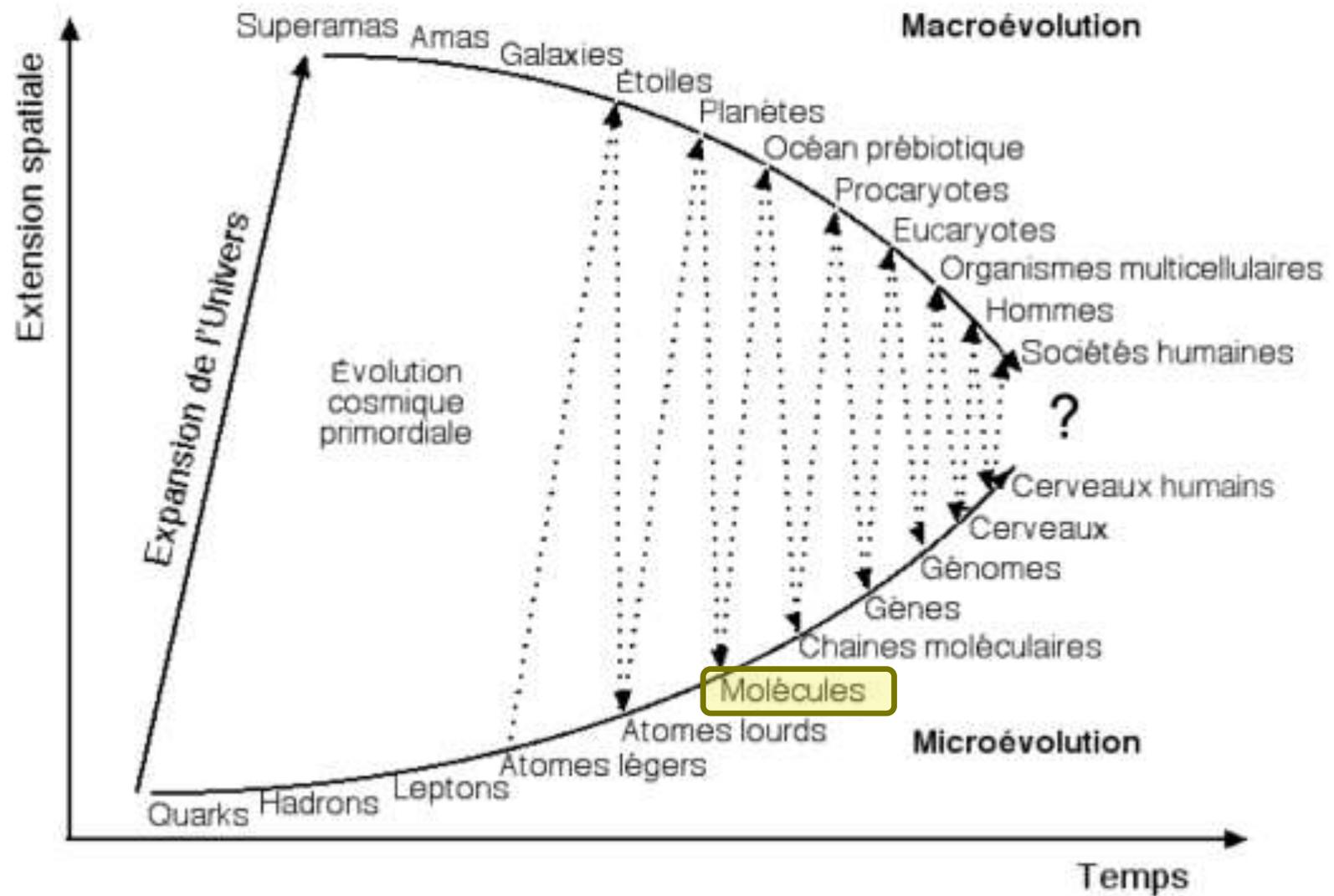
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



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

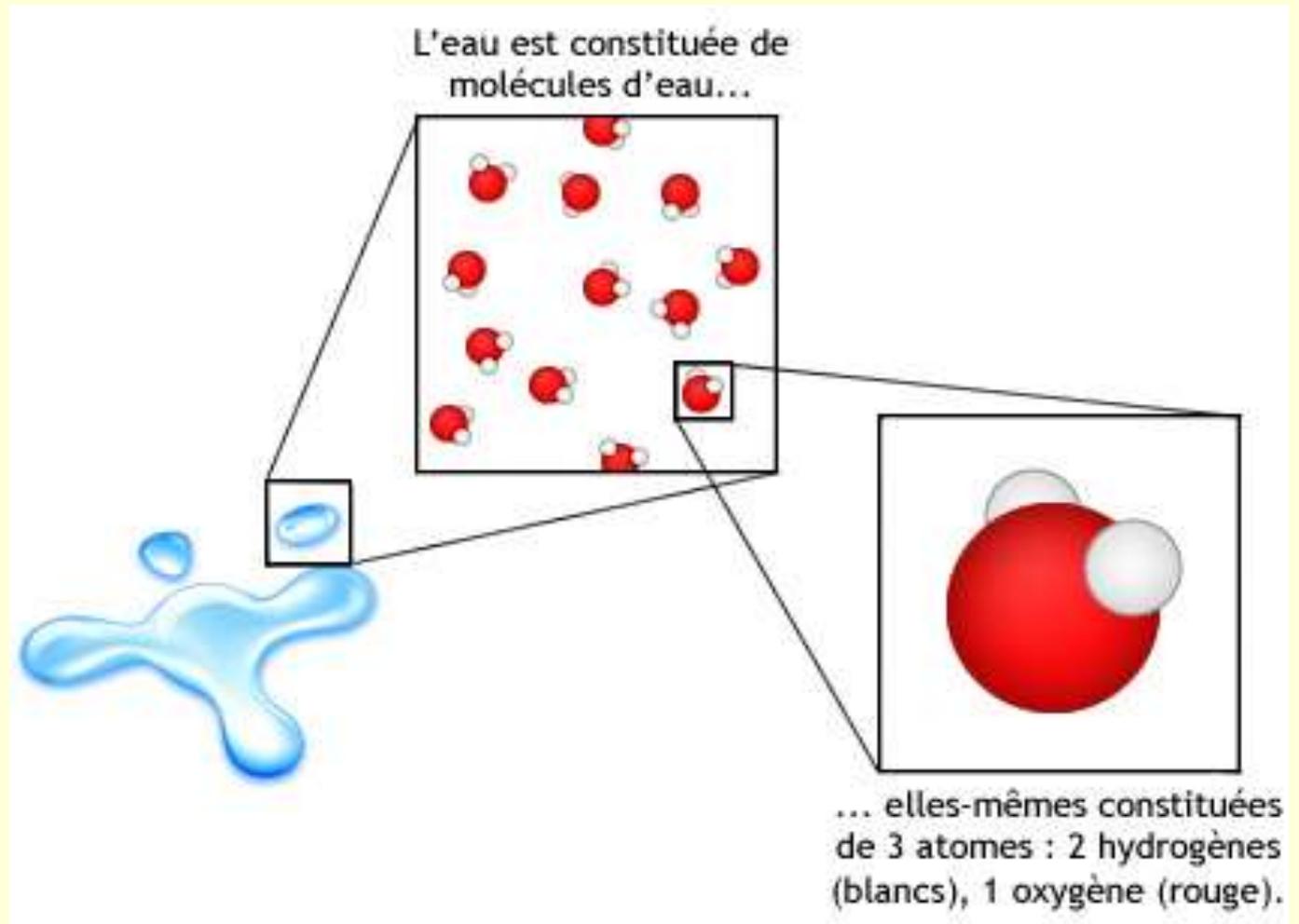


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



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

## Molécule :

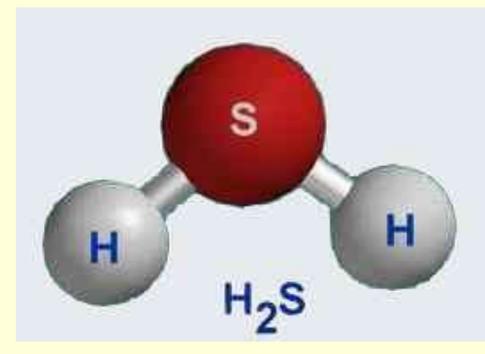
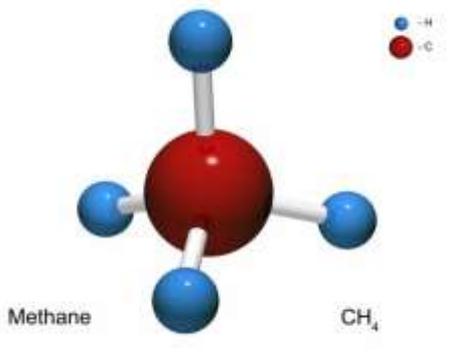
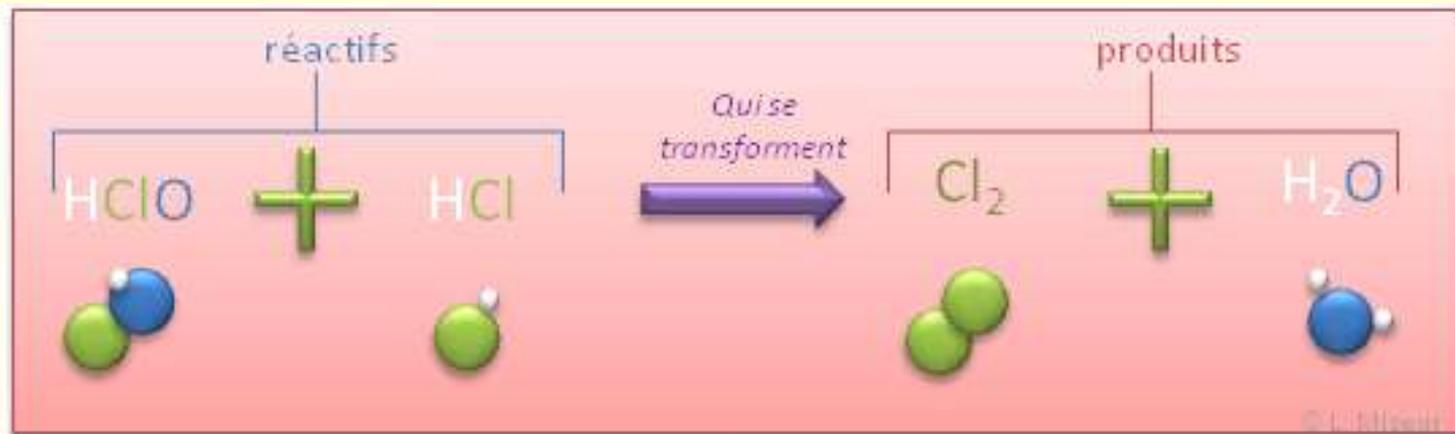


## Molécule :

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

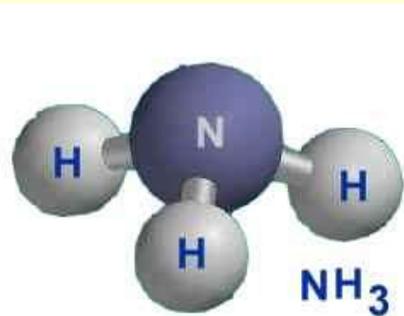
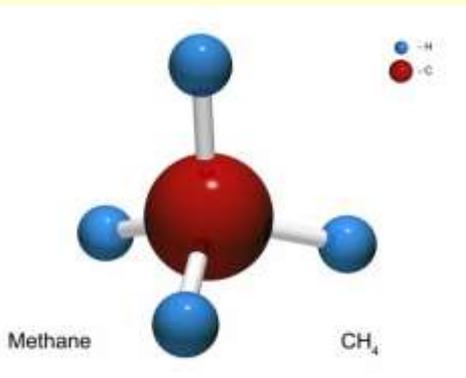
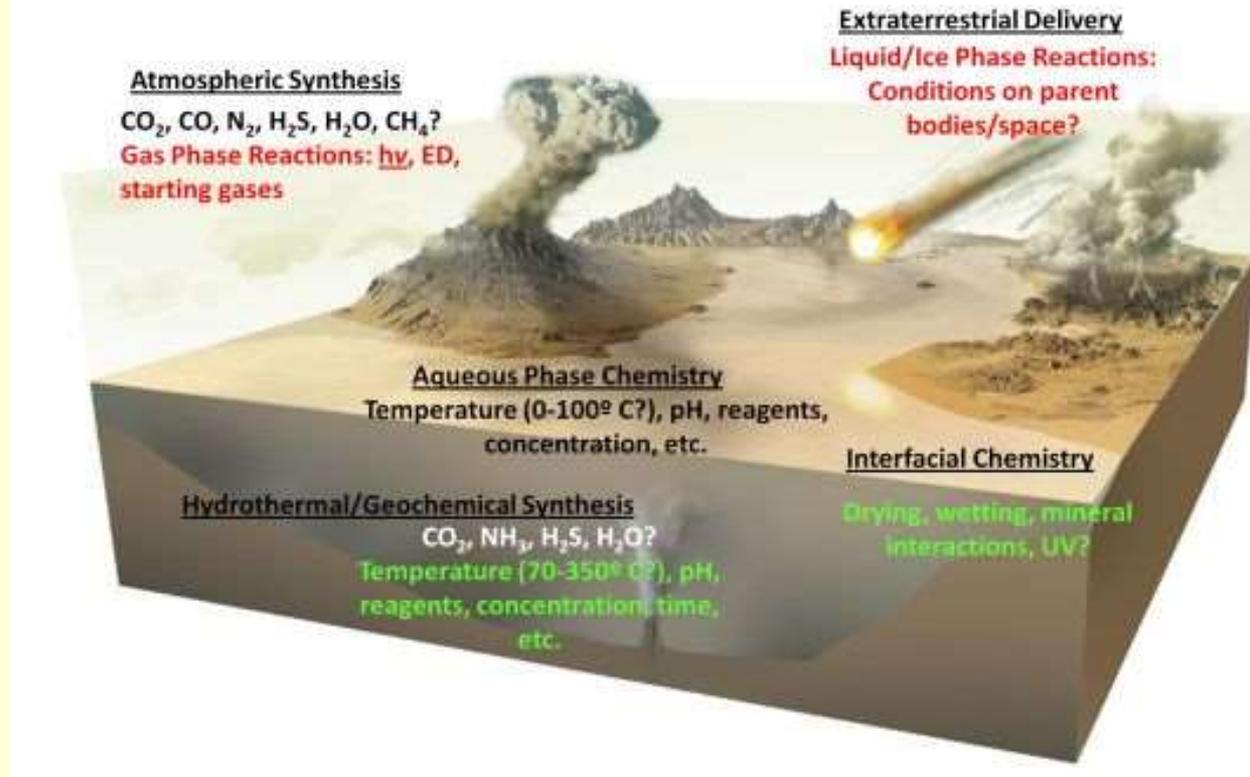
L'assemblage d'atomes constituant une molécule **n'est pas définitif**.

Il est susceptible de subir des modifications; on a alors une **réaction chimique**.



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** ».

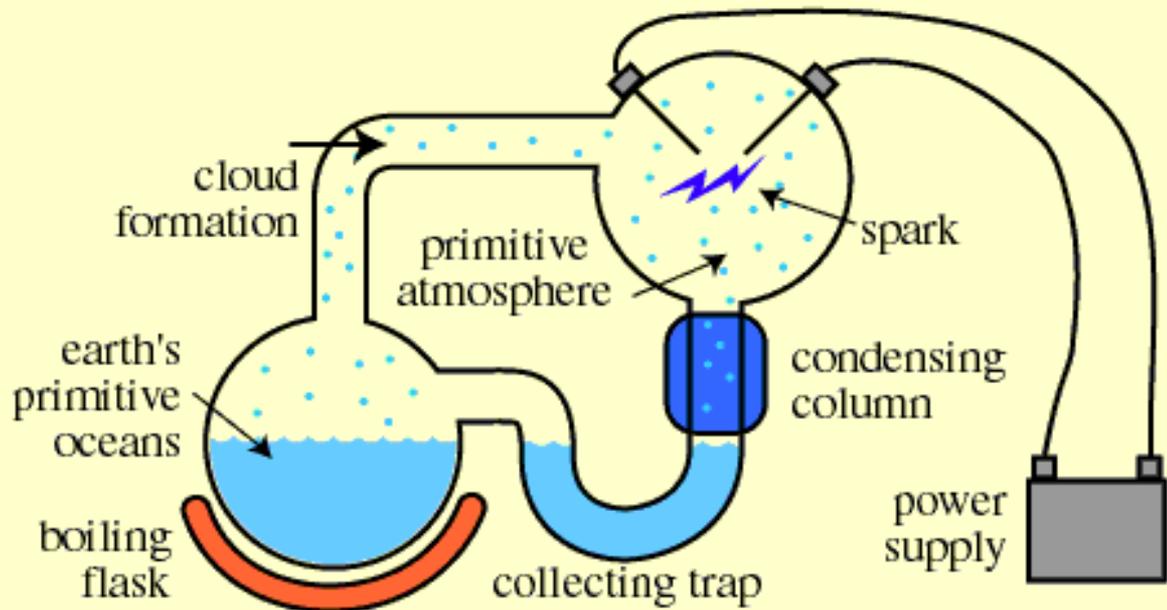


atmosphère et "soupe" primitive

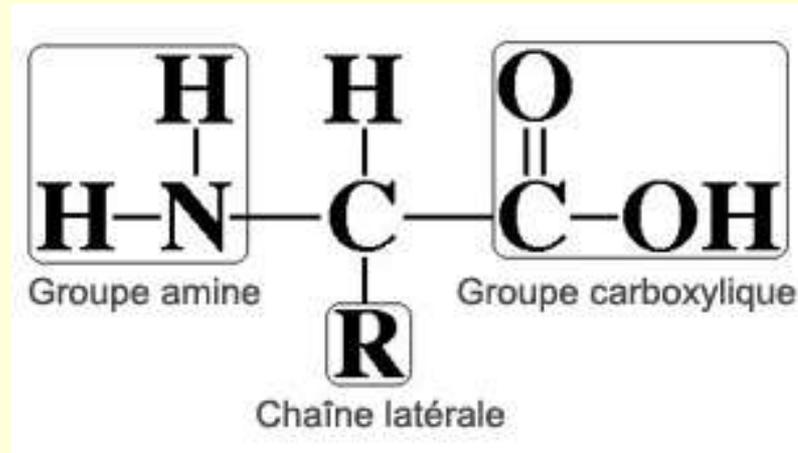
**1953, Miller et Urey :**

confirment cette hypothèse par une célèbre expérience in vitro où des **molécules organiques** apparaissent

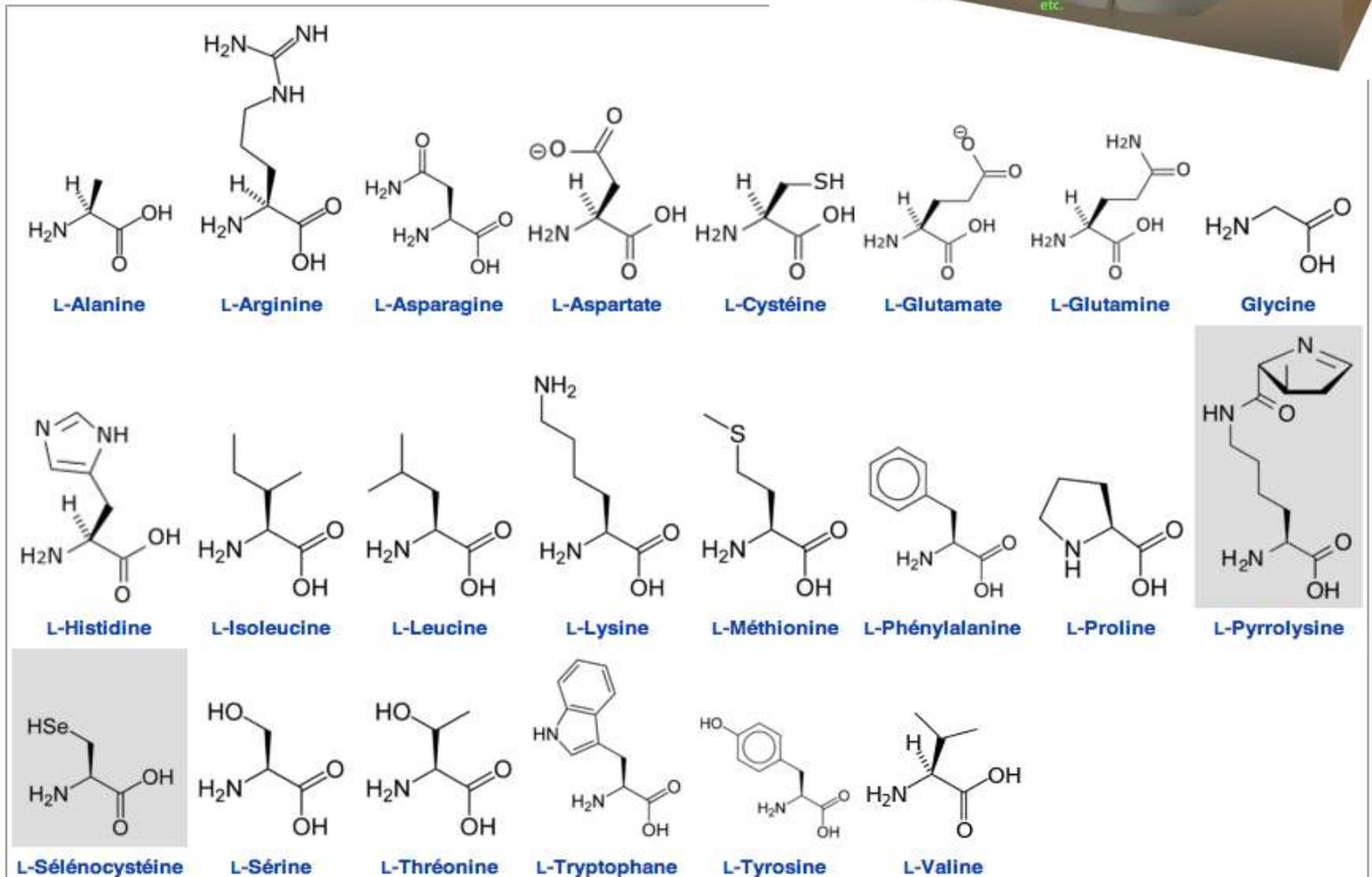
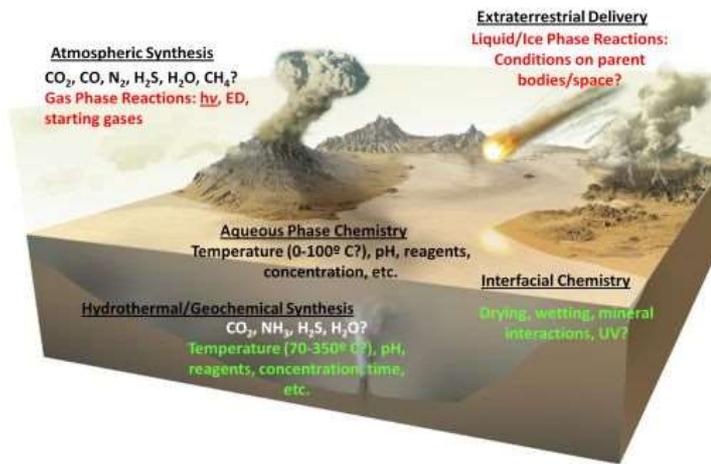
(**acides aminés**, etc.)



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



En présence du puissant rayonnement solaire (rayons UV...), ce mélange de gaz de l'atmosphère primitive terrestre a donc pu donner naissance à plusieurs **molécules un peu plus complexe** telles que les **acides aminés**.

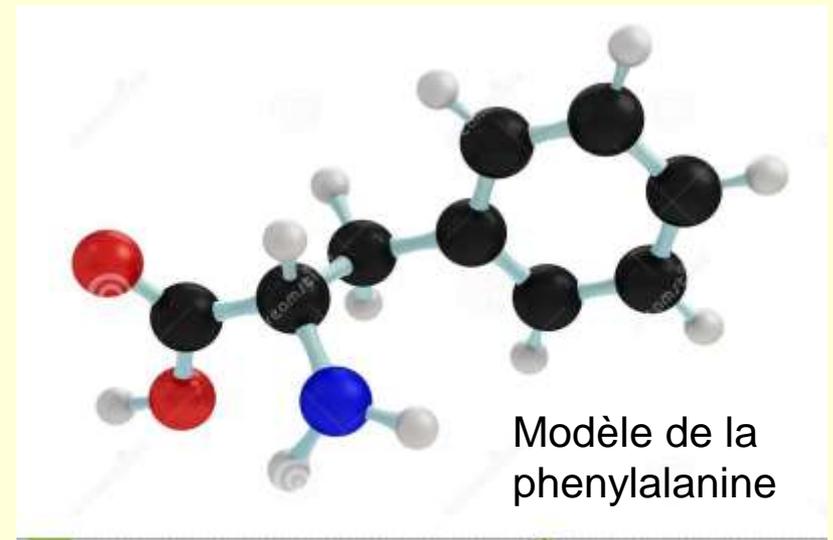
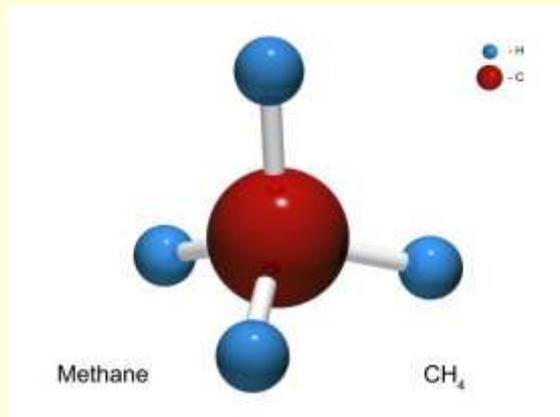


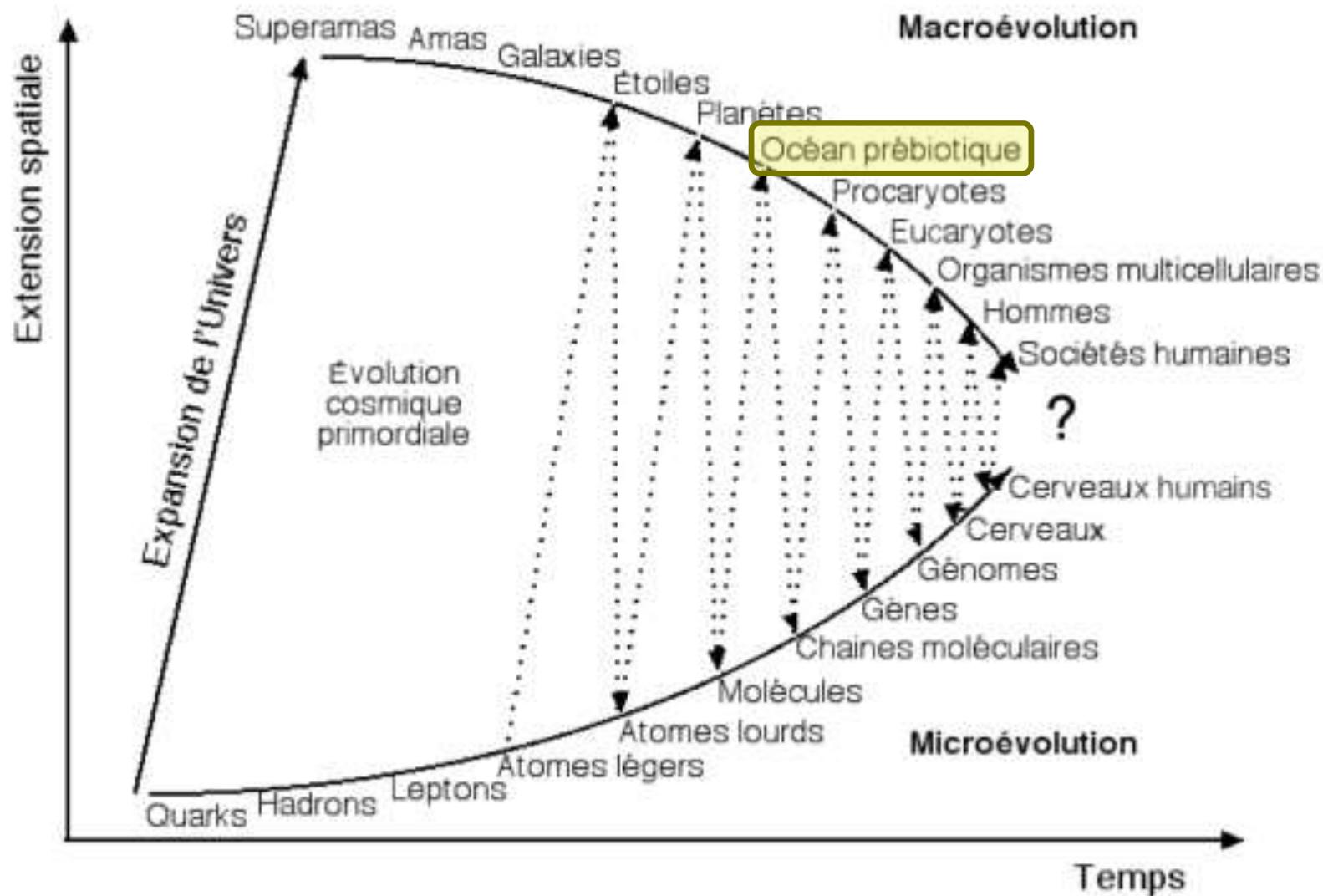
On peut donc dire que le passage de molécules simples vers des molécules organiques comme les acides aminés s'accompagne d'une **croissance de la complexité**.

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 vont former "spontanément", sans l'intervention de forces extérieures, **les formes moléculaires les plus stables** pour les conditions physico-chimiques qui sont réunies.





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

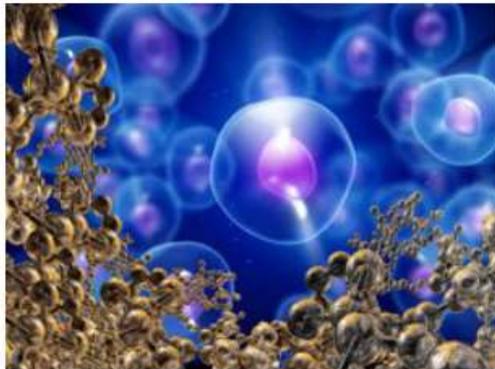
# Quand apparaît la vie ?



CONFÉRENCE - AMPHITHÉÂTRE  
19 mars 2015 - 19h00

DU CHIMIQUE AU BIOLOGIQUE  
**AINSI VINT LA VIE!**

**Encore beaucoup  
de questions...**



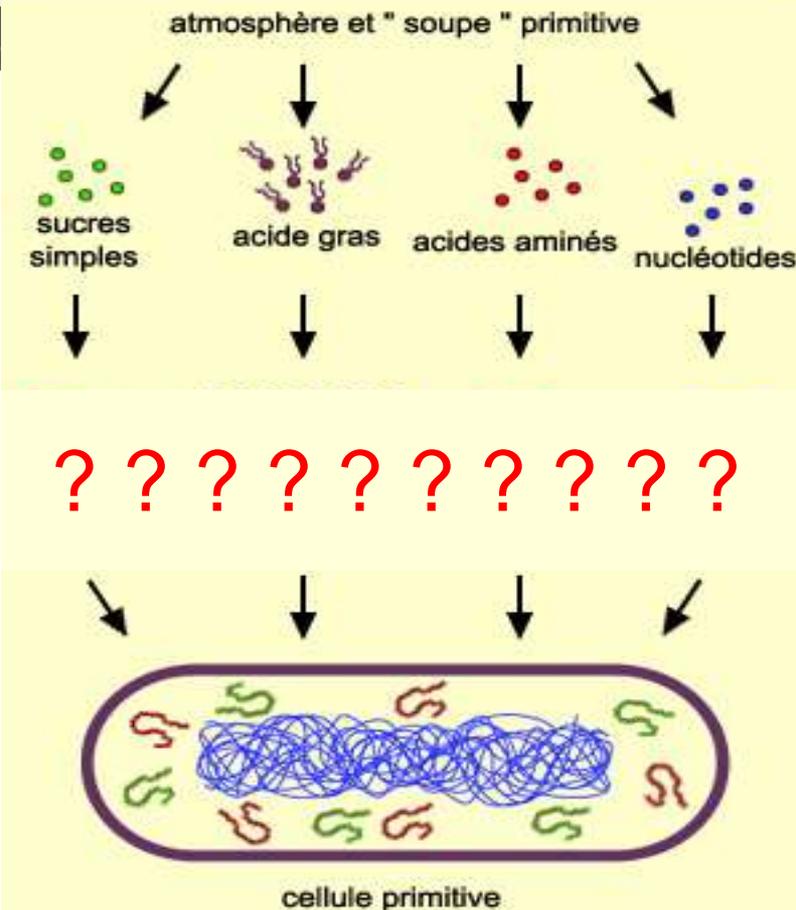
## Une conférence de Christophe Malaterre

De la formation de la Terre, il y a environ 4,5 milliards d'années, à l'apparition de la vie, il y a de cela 3,5 à 3,8 milliards d'années, que s'est-il passé?

Comment sommes-nous passés de l'inerte au vivant? Une évolution chimique aurait-elle précédé l'évolution biologique? Et quels en seraient les processus évolutifs? Enquête scientifique et philosophique sur les origines et la nature même de la vie.

**Christophe Malaterre** est professeur de philosophie des sciences à l'UQAM et titulaire de la Chaire de recherche UQAM en

philosophie des sciences. Il a notamment publié *Les origines de la vie: émergence ou explication réductive?* (Éditions Hermann, 2010) et a collaboré à l'ouvrage collectif *De l'inerte au vivant. Une enquête scientifique et philosophique* (La ville brûle, 2013). Ses travaux lui ont valu de nombreux prix, dont celui du jeune chercheur de la Société française de philosophie des sciences, en 2010.



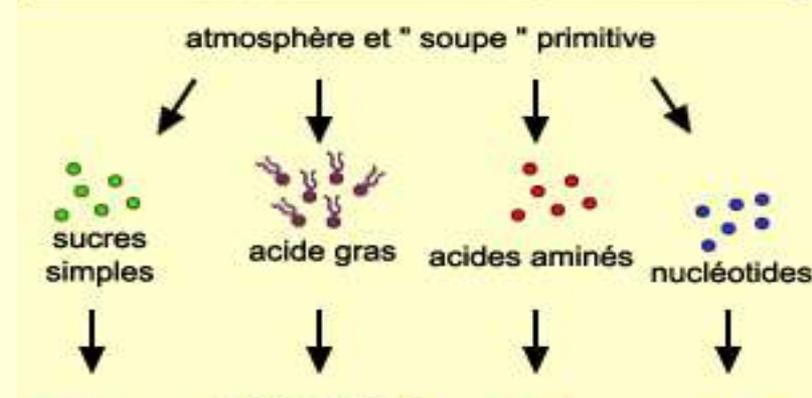
# Quand apparaît la vie ?

**Les définitions** de la vie sont souvent des listes de critères comprenant des éléments comme :

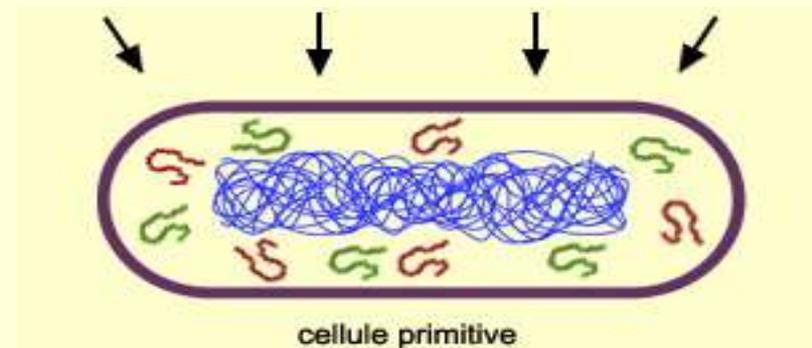
- Développement ou croissance
- Métabolisme
- Motilité
- Reproduction
- Réponse à des stimuli
- Etc.

Le biologiste Radu Popa a listé plus de 300 définitions de la vie...dont aucune ne fait l'unanimité !

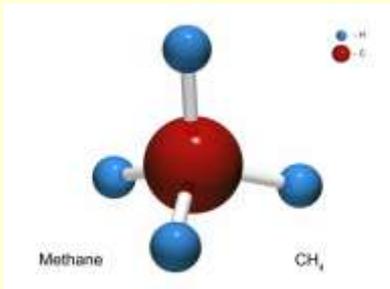
<http://planete.gaia.free.fr/sciences/vivant/presque.html>  
[http://carlzimmer.com/articles/2012.php?subaction=showfull&id=1329948013&archive=&start\\_from=&ucat=15&](http://carlzimmer.com/articles/2012.php?subaction=showfull&id=1329948013&archive=&start_from=&ucat=15&)



?? ? ? ? ? ? ? ? ? ?



# Quand apparaît la vie ?



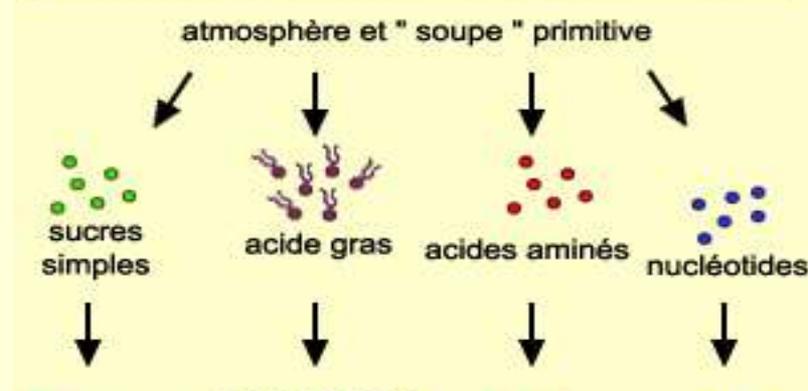
Qu'est-ce qui se passe entre les deux ?

Non

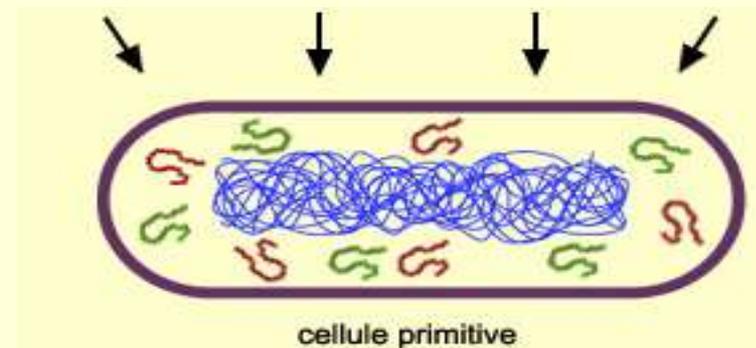


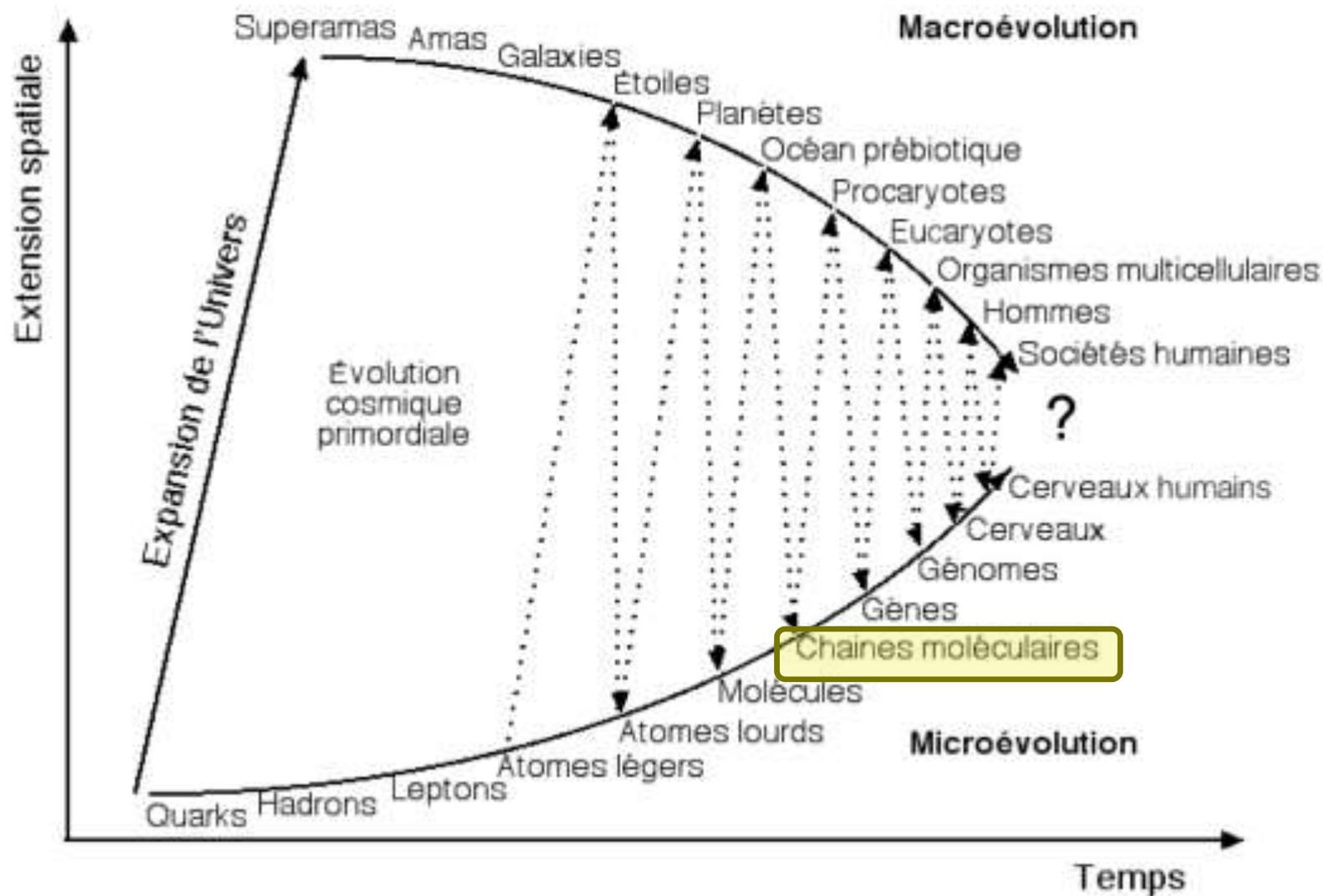
Oui

?



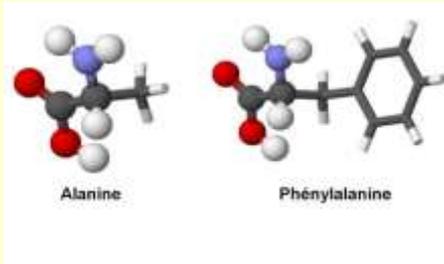
????????????



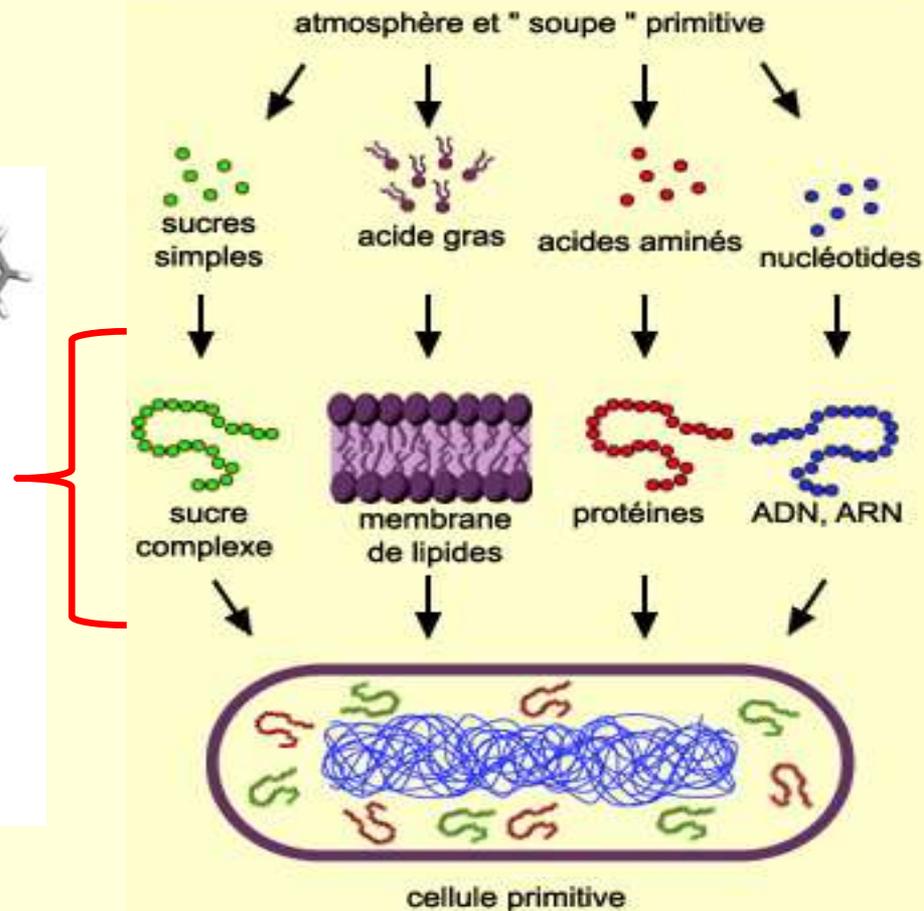
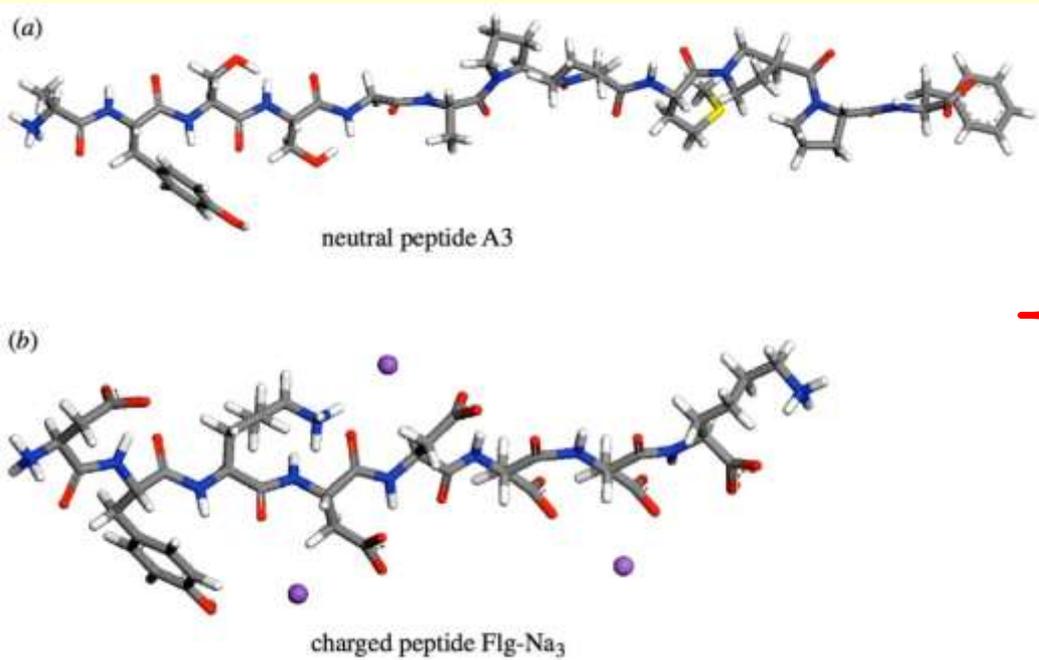


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

Comment passe-t-on de molécules organiques simples (acides aminés, etc.)...

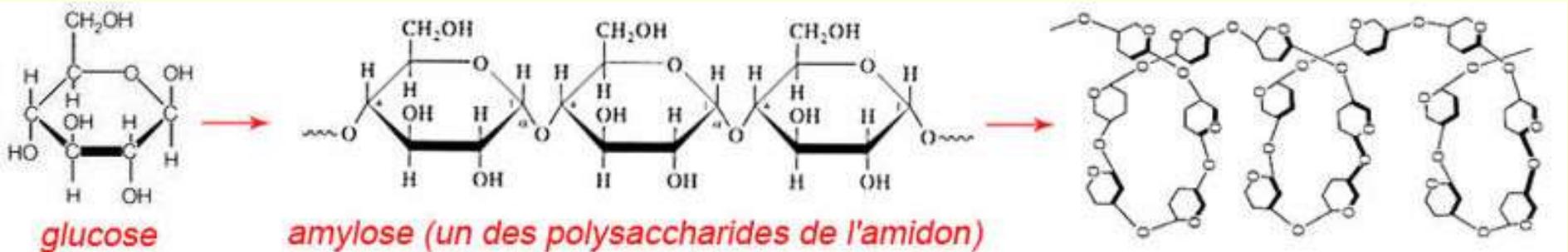


...à des chaînes de molécules...

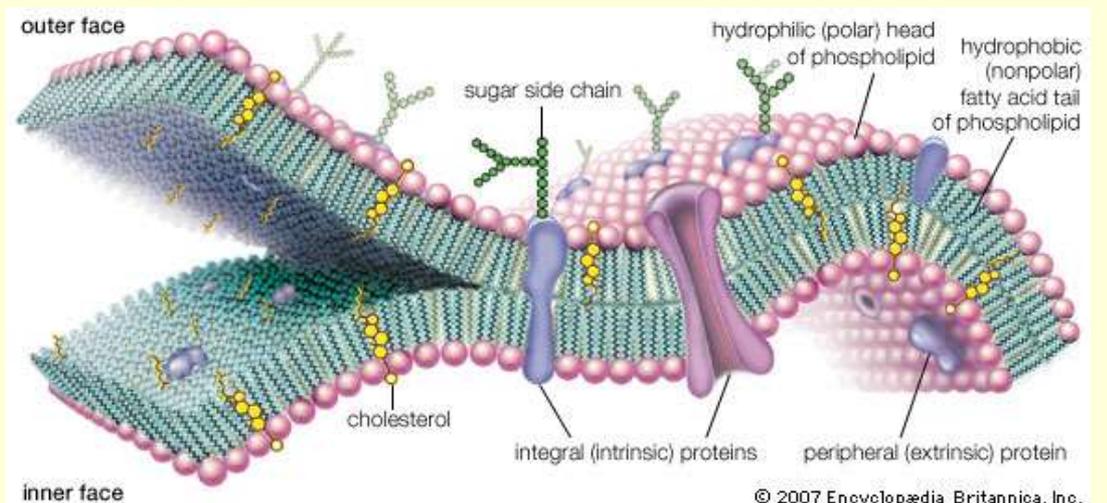
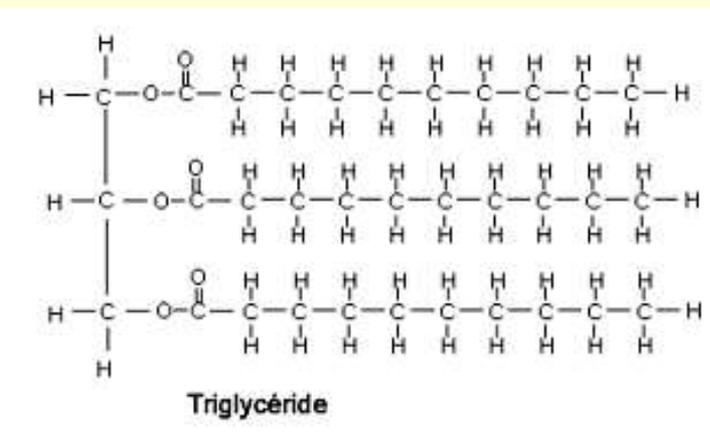


Car les molécules organiques vont avoir tendance à former des chaînes moléculaires de :

- 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.

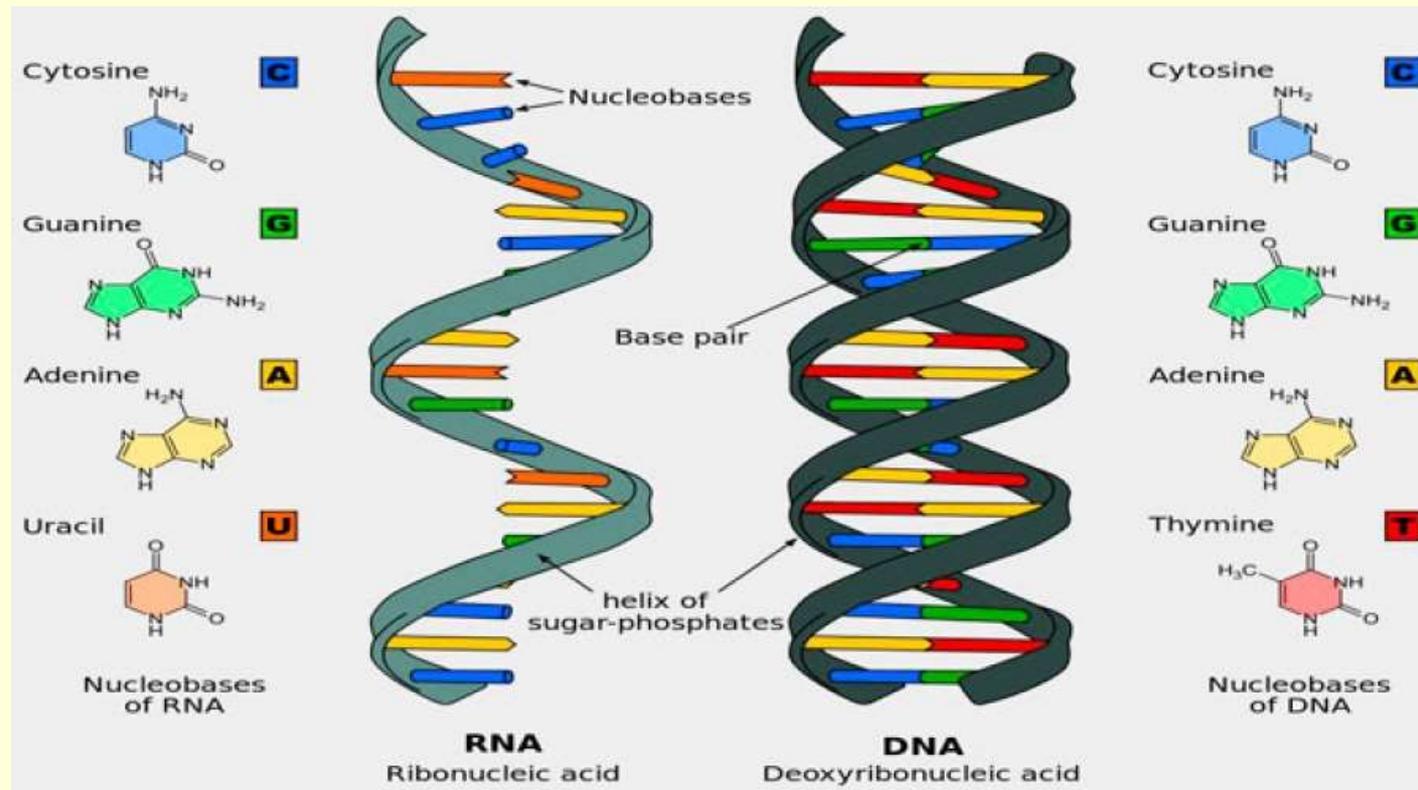


« Pas de membrane, pas de cellules.  
Pas de cellules, pas de neurones.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »

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

Car les molécules organiques vont avoir tendance à former des chaînes moléculaires de :

- Glucides
- Lipides
- **Bases nucléiques**



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

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...

Car les molécules organiques vont avoir tendance à former des chaînes moléculaires de :

- Glucides
- Lipides
- Bases nucléiques

### **4e et dernière catégorie de molécules organiques qui forment des chaînes...**

Comment nos muscles se contractent ?

Comment notre système immunitaire nous défend ?

Comment notre rétine transforme de la lumière en influx nerveux ?

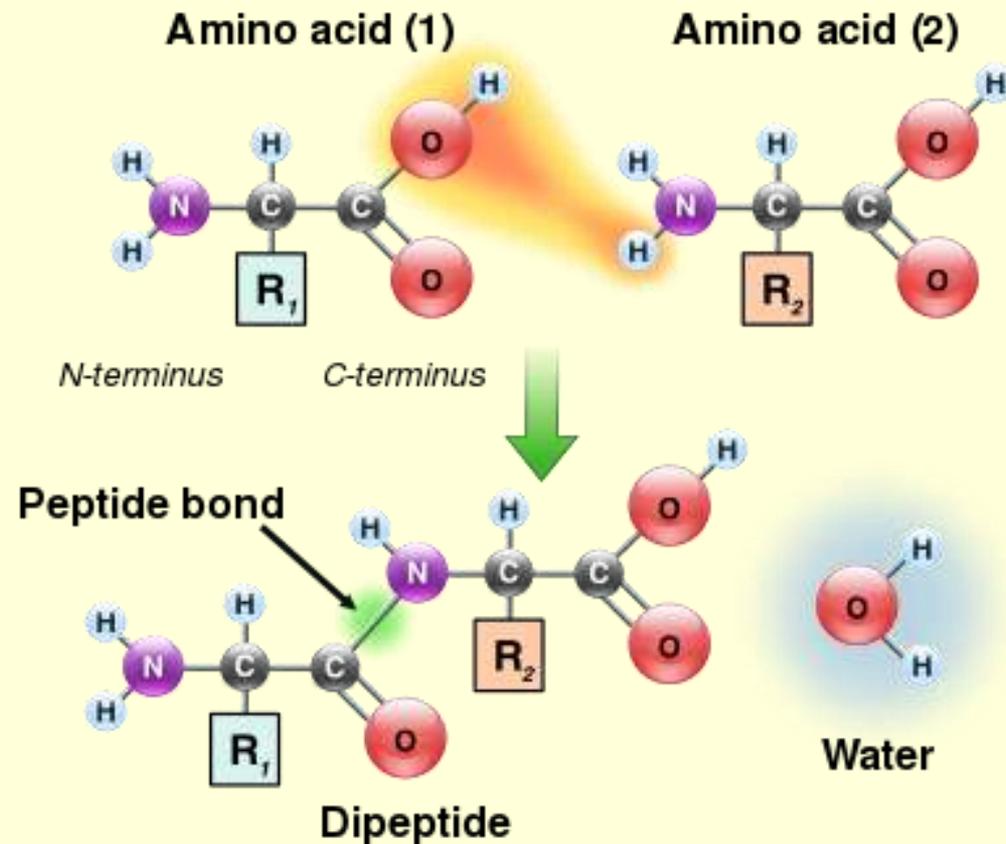
Comment les plantes convertissent cette lumière en énergie ?

Comment nos neurotransmetteurs permettent le passage de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre ?

**Grâce à des protéines !**

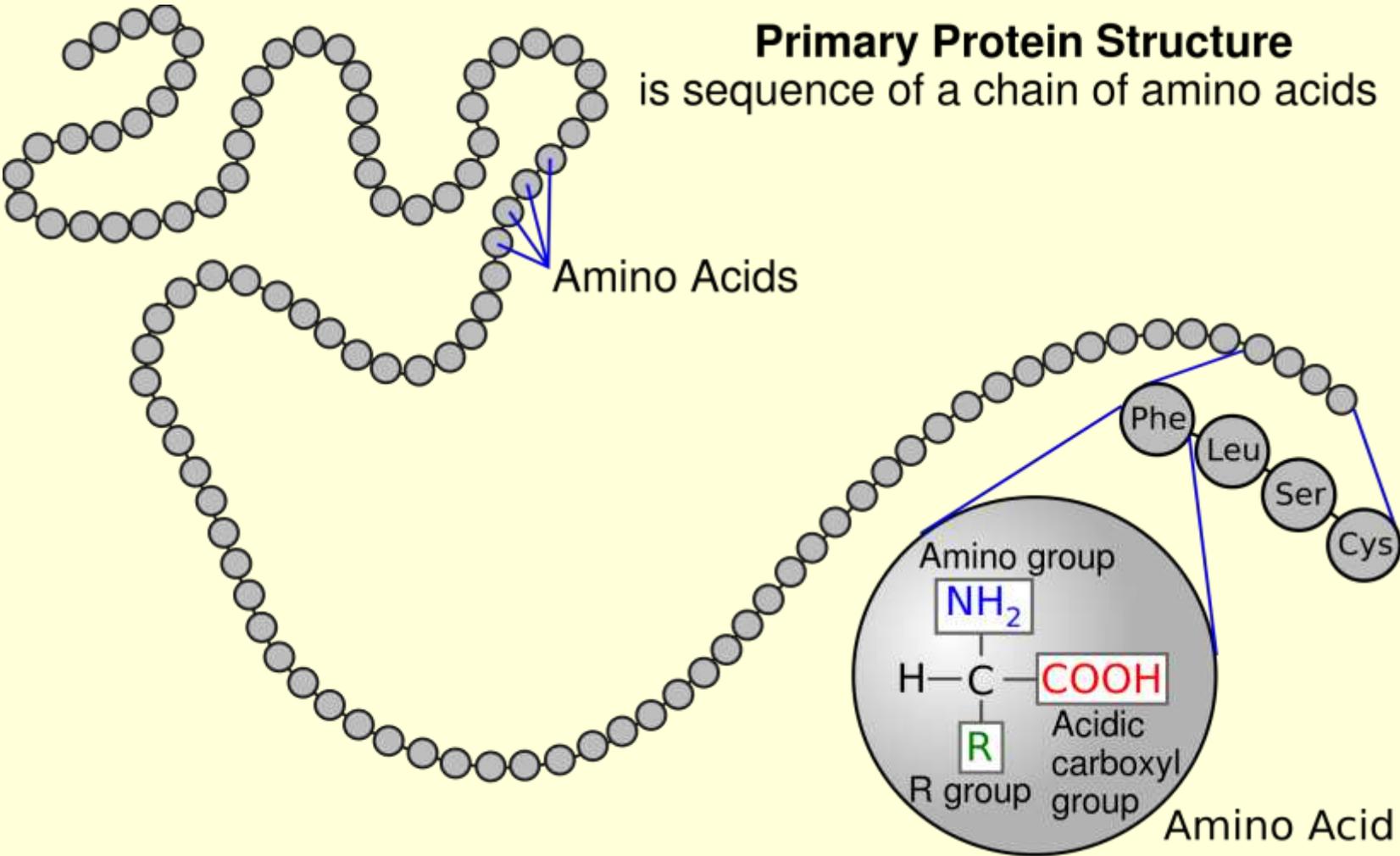
Car les molécules organiques vont avoir tendance à former des chaînes moléculaires de :

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

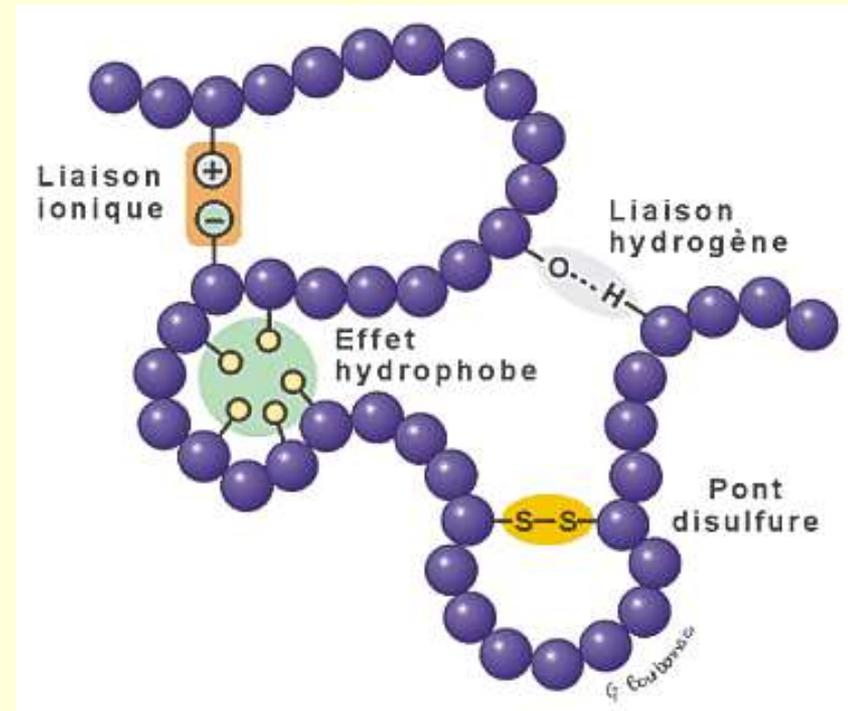
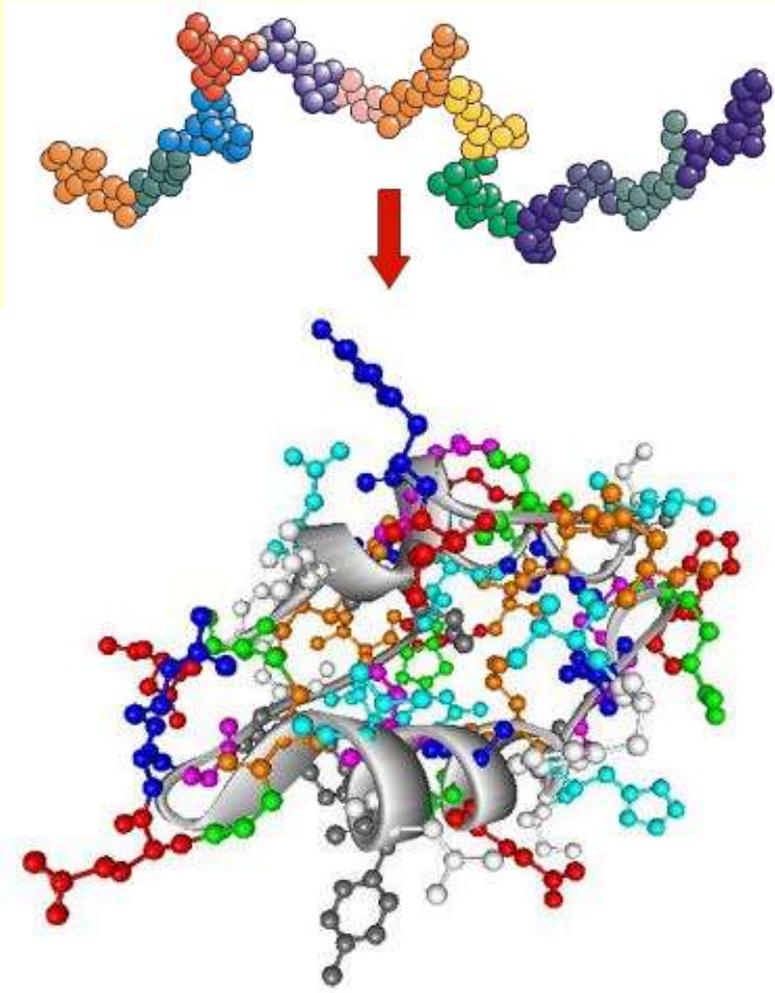


## Primary Protein Structure

is sequence of a chain of amino acids

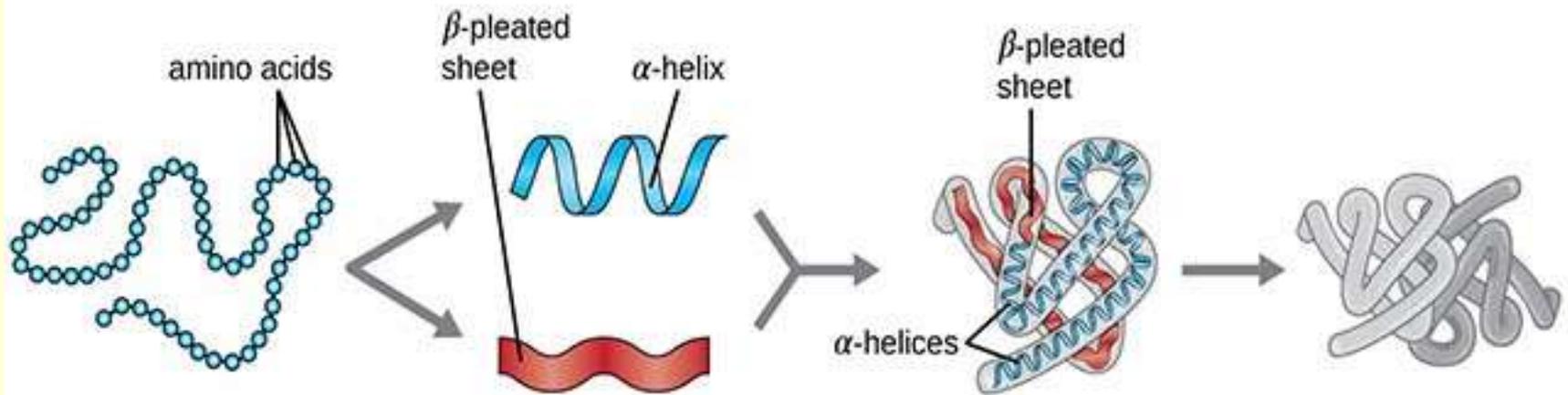


→ Vers 1953,  
on comprend qu'il y a un  
**repliement** de la chaîne  
d'acides aminés



qui est déterminé par la  
**séquence** primaire des acides  
aminés de la protéine  
(la suite des « perles » dans le  
« collier de perles »).

# Structure of Proteins



## Primary Protein Structure

Sequence of a chain of amino acids

## Secondary Protein Structure

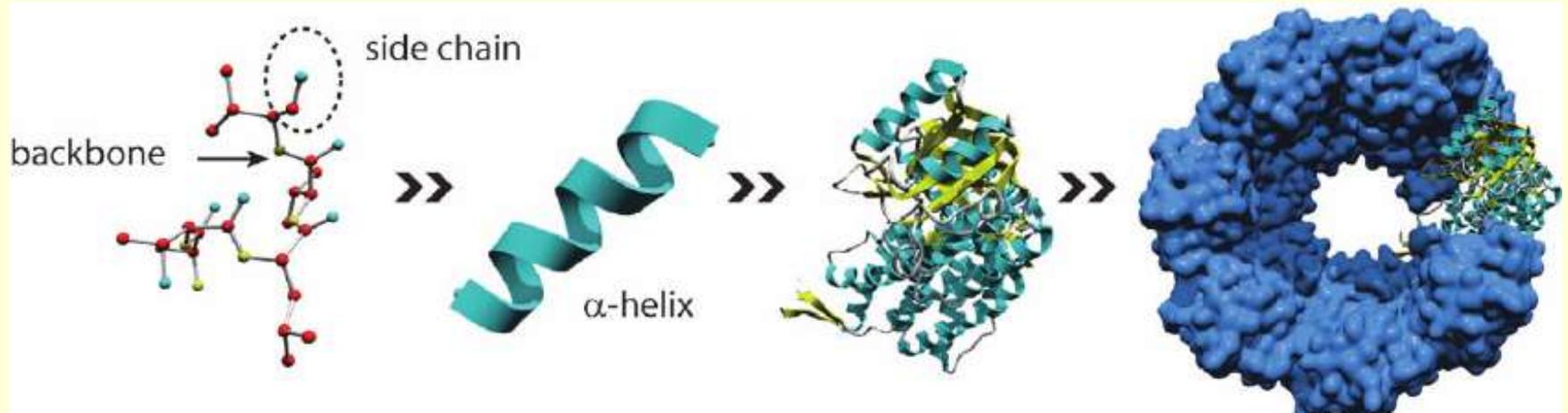
Local folding of the polypeptide chain into helices or sheets

## Tertiary Protein Structure

three-dimensional folding pattern of a protein due to side chain interactions

## Quaternary Protein Structure

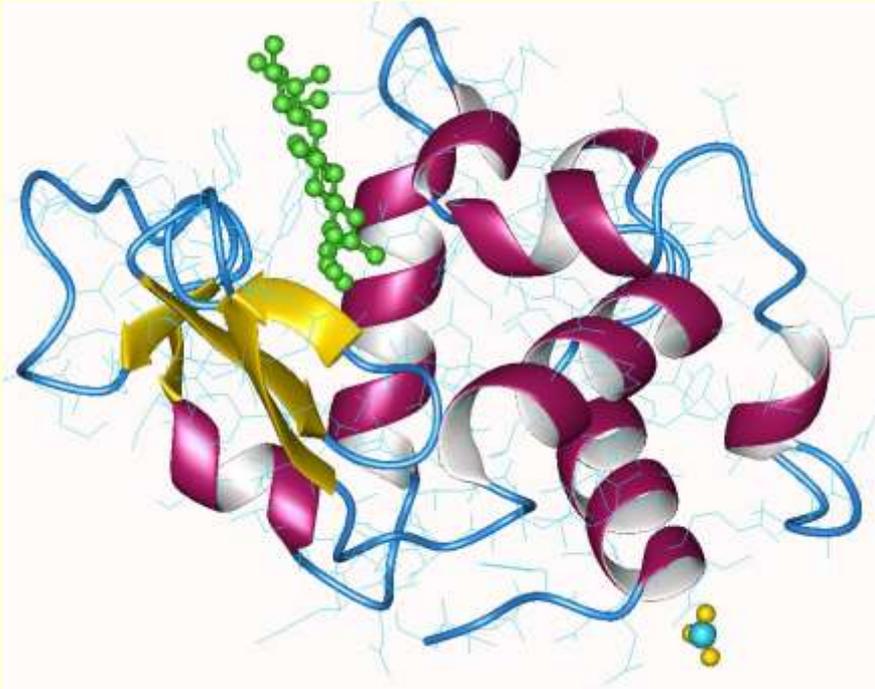
protein consisting of more than one amino acid chain



# The protein folding problem: a major conundrum of science: Ken Dill at TEDxSBU

<https://www.youtube.com/watch?v=zm-3kovWpNQ> [ 5:30 à 6:00 ]





De combien de façons une suite de 129 acides aminés, comme celle de l'enzyme **lysozyme**, peut-elle exister?

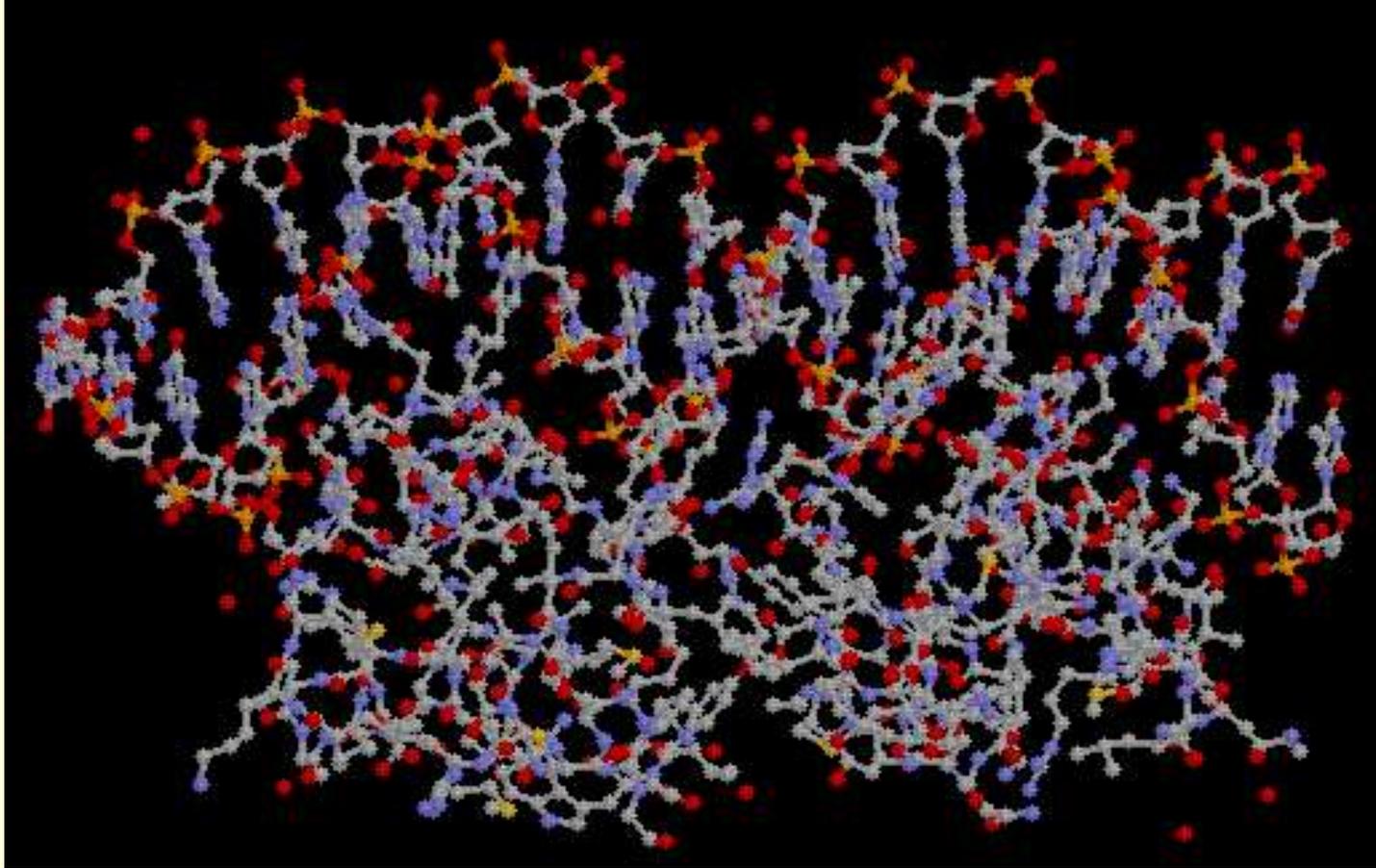
Comme il existe 20 acides aminés différents, cela donne  $20^{129}$ ,  
ou encore  $10^{168}$  (10 suivi par 168 zéros).

Donc rendu à ce niveau de complexité, il semble y avoir des événements « **accidentels** »

qui font en sorte que si on « rejouait le film de l'évolution » une autre fois, on n'obtiendrait pas le même résultat... (S. J. Gould)

Ce n'est plus seulement la forme la « plus stable », mais toutes sortes de conditions **contingentes** qui ont déterminé la suite des acides aminés

(conditions contingentes que l'on ne connaîtra jamais...)



On peut donc dire que le **repliement des protéines est le fait de l'auto-organisation** (toujours sous contrôle thermodynamique) **ET** d'événements **contingents**.

Et cela amène « **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...)

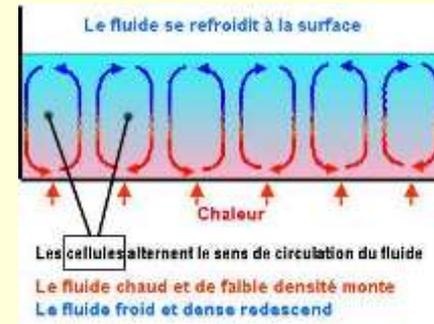
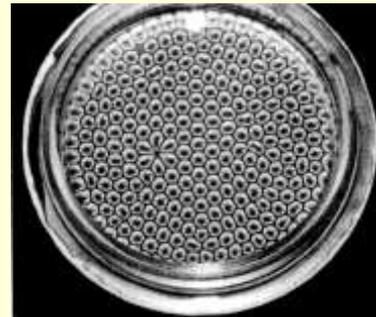
La notion d'**auto-organisation** permet de comprendre comment **de l'ordre peut apparaître spontanément au sein du désordre [...]**

et amener **l'émergence spontanée d'une structure** sous l'effet conjoint d'un apport extérieur d'énergie et des interactions entre les éléments du système considéré.

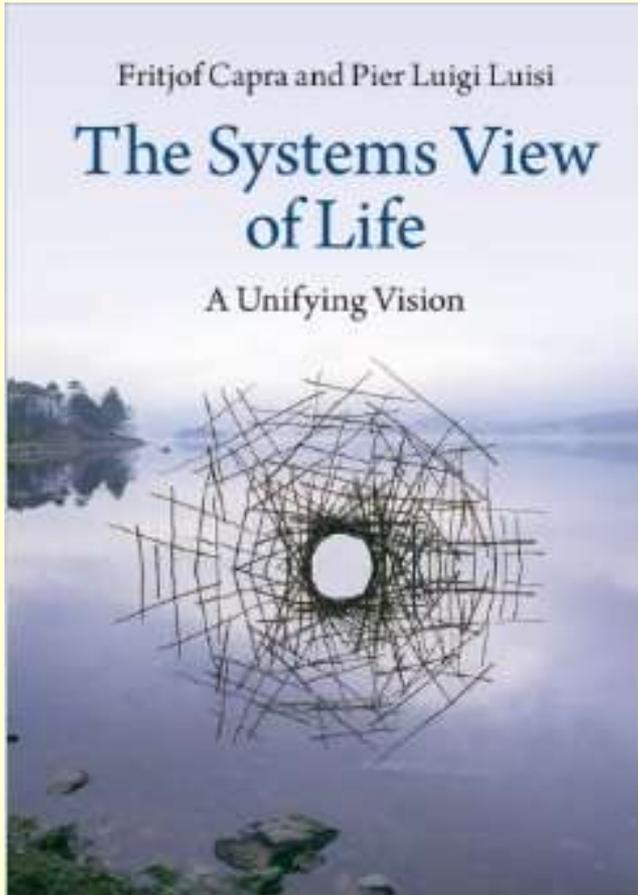
(grâce aux propriétés de la matière donnée par des lois naturelles, et aucune autre « volonté » extérieure)

Exemples :

- l'apparition de motifs périodiques dans un liquide chauffé par le dessous (cellules de convection)
- la formation des dunes (par l'interaction du sable et du vent)
- un nuage de gaz et de poussière qui va former, grâce à la gravité, une étoile



- Les interactions moléculaires qui vont donner lieu aux processus du vivant

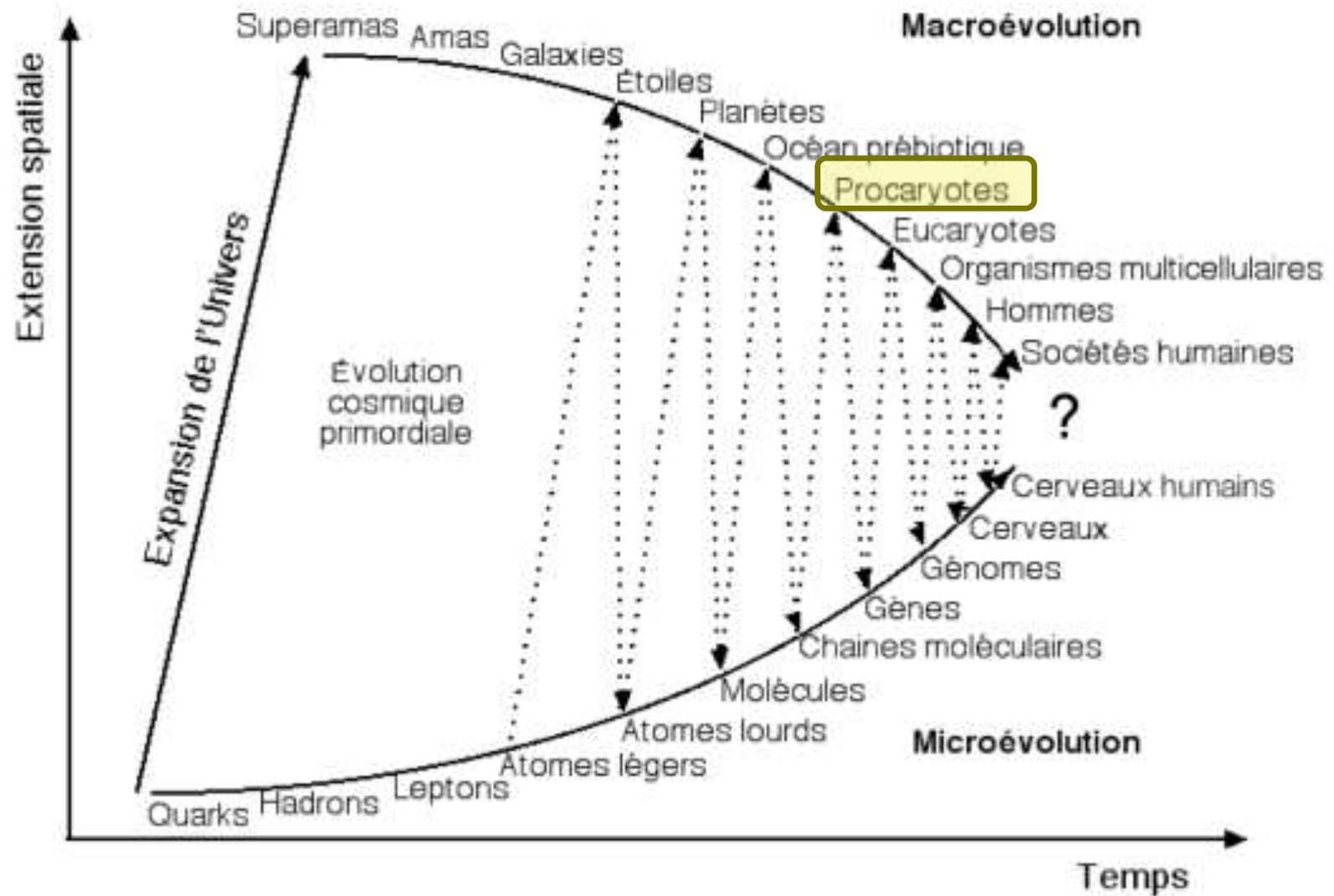


Durant l'histoire occidentale de la science et de la philosophie, il y a eu une tension entre 2 perspectives :

- 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.

Apparition des premiers êtres vivants.

## Les plus anciennes traces de vie découvertes dans le Nord-du-Québec

1 mars 2017

<http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1019725/vie-terre-decouverte-nord-du-quebec-nuvvuagittug>

Extraits :

« Des structures présentes dans des roches de Nuvvuagittuq, situé sur la côte est de la baie d'Hudson, laissent à penser qu'il s'agit de micro-organismes fossilisés qui dateraient d'au moins **3,8 milliards d'années, ou plus probablement de 4,3 milliards d'années.**

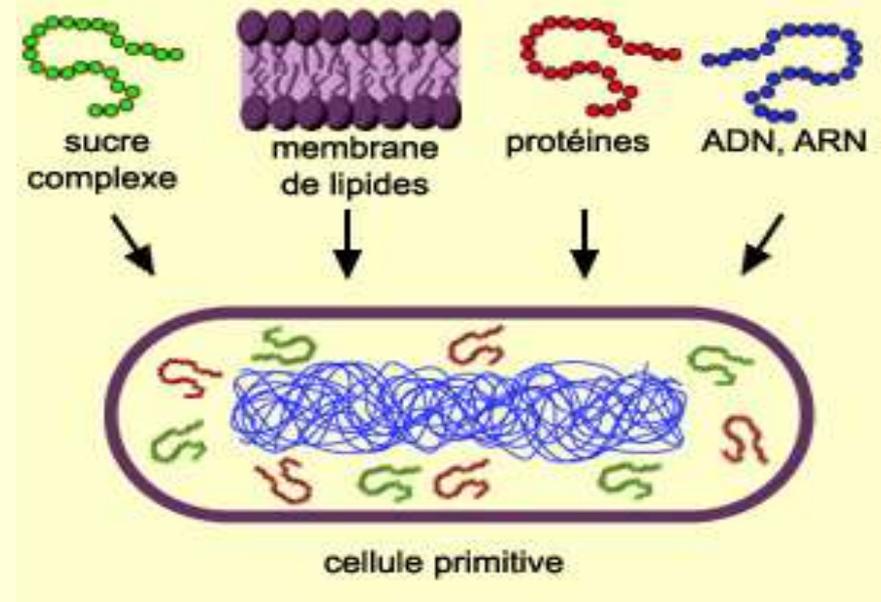
...[Cette découverte] révèle aussi que les conditions de l'apparition de la vie sur Terre existaient à un stade précoce de son évolution. »

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

une notion très utile est celle **d'autopoïèse**,

élaborée par Humberto Maturana et Francisco Varela

dans les années 1970.

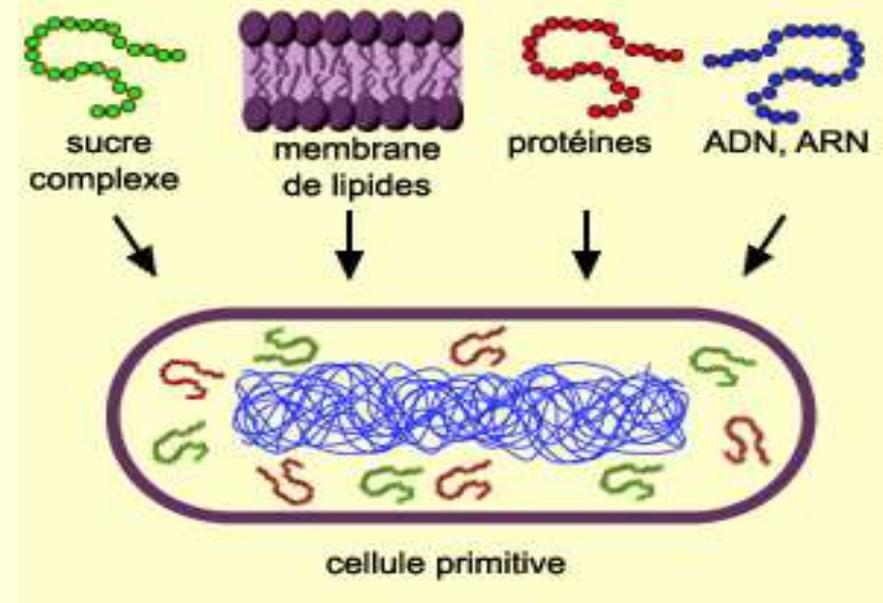


Pour comprendre ce qu'est une **cellule vivante**,

une notion très utile est celle **d'autopoïèse**,

élaborée par Humberto Maturana et Francisco Varela

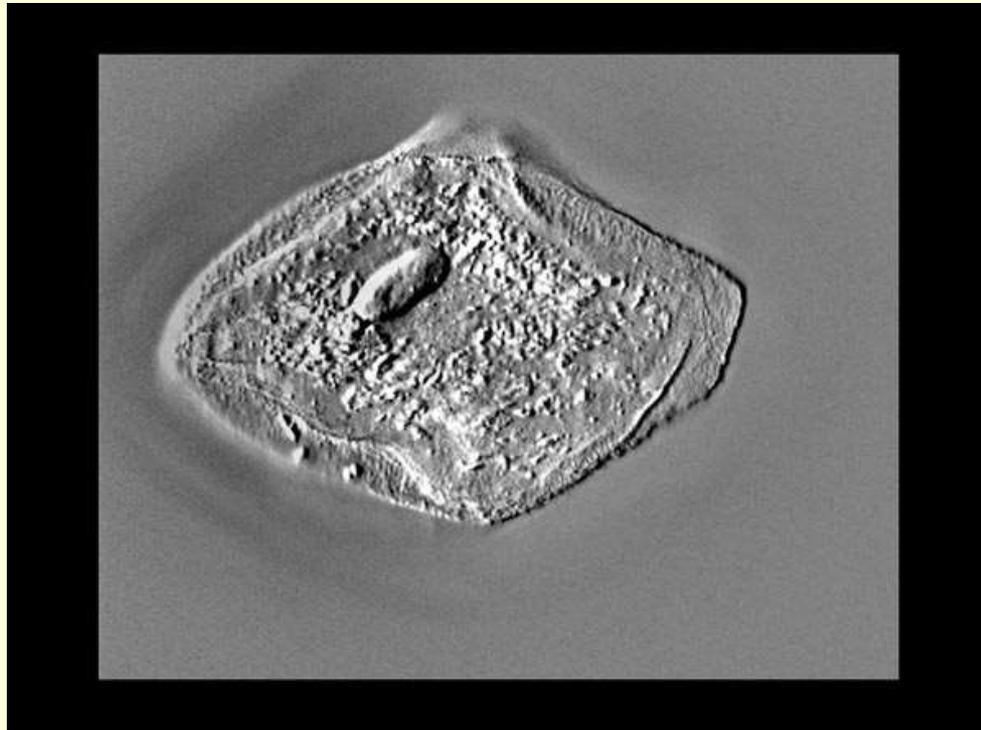
dans les années 1970.



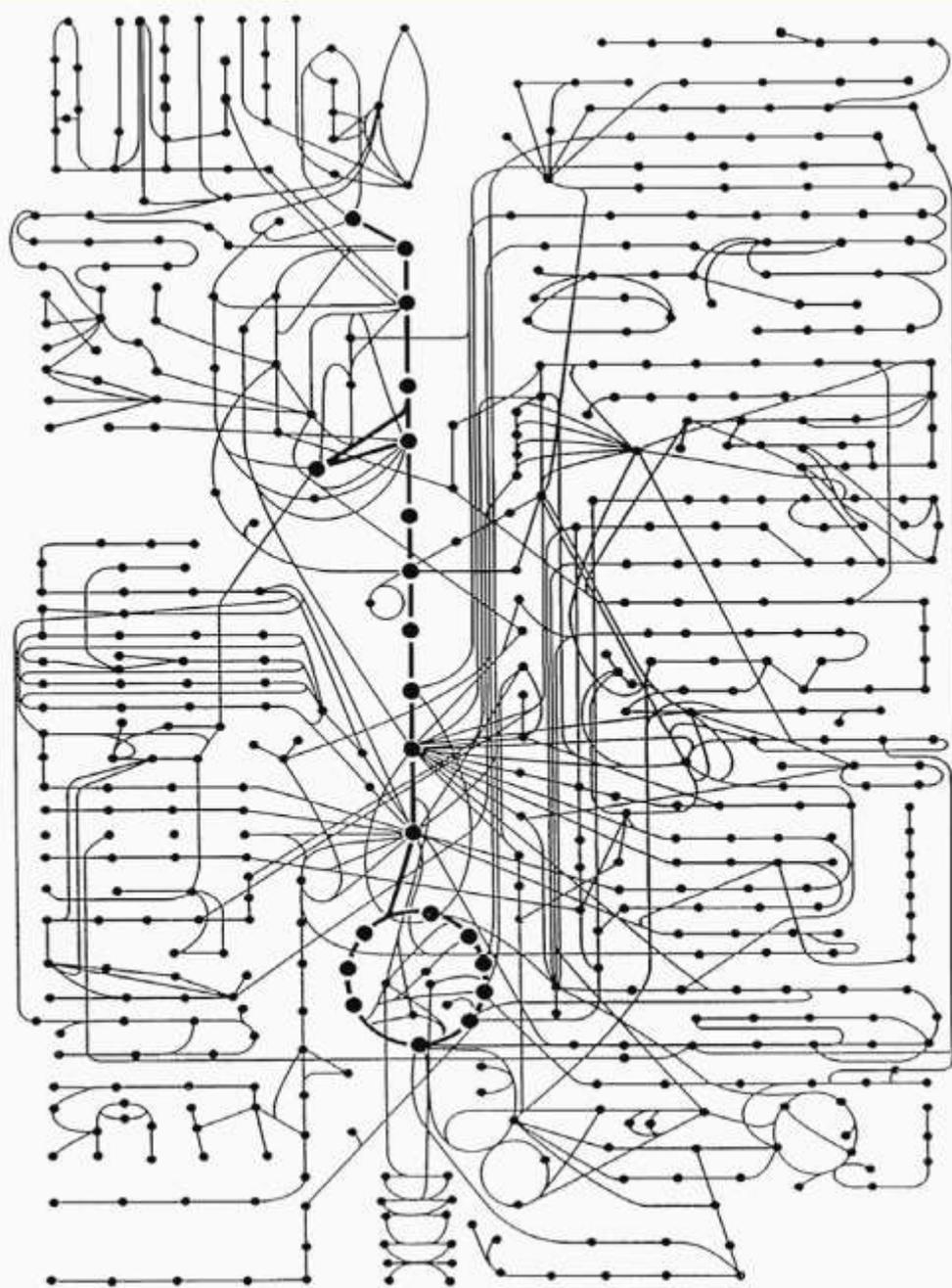
« Notre proposition est que les être vivants sont caractérisés par le fait que, littéralement, ils sont continuellement en train de **s'auto-produire**. »

- 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. »



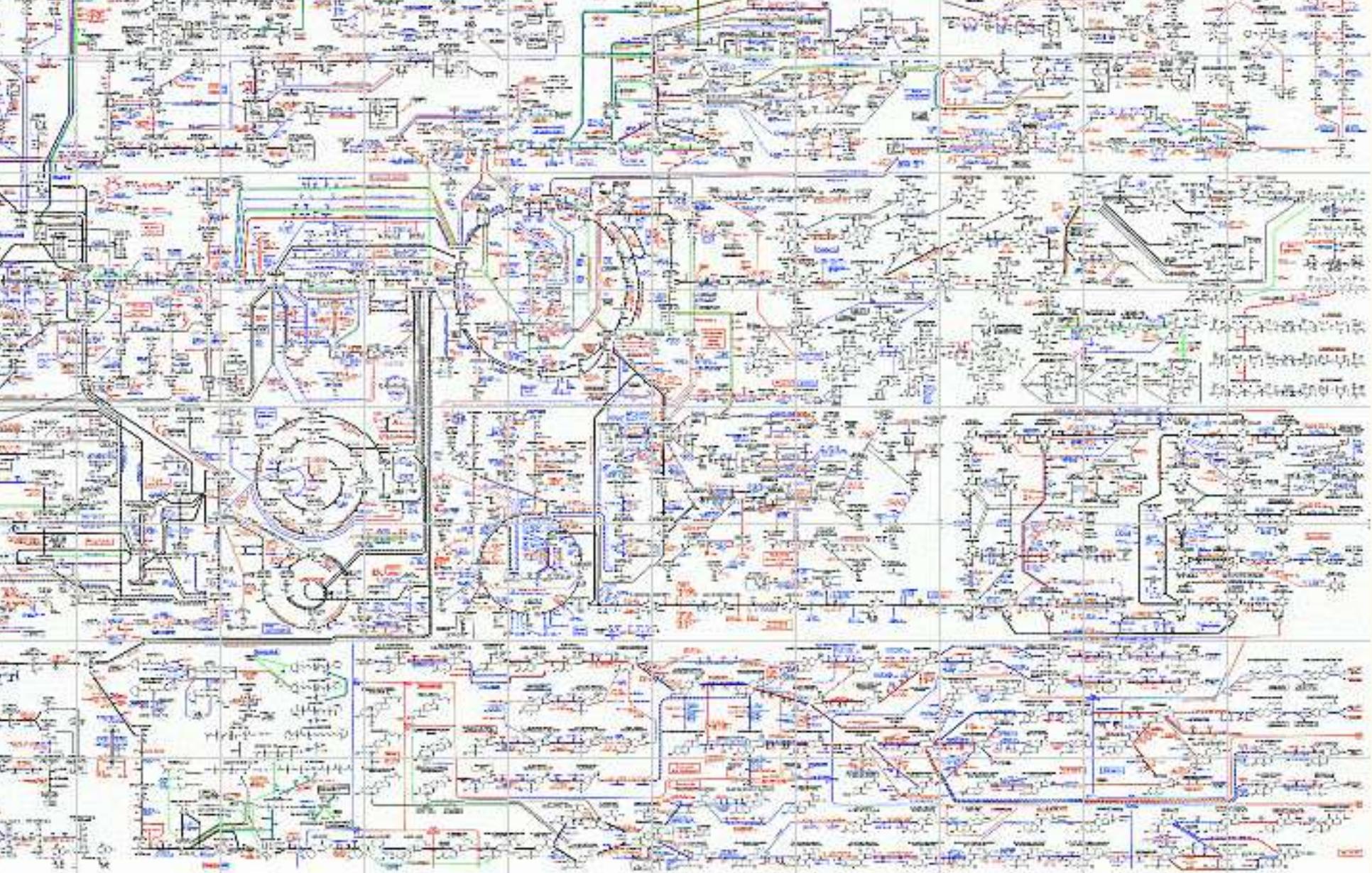
An image of a human buccal epithelial cell obtained using Differential Interference Contrast (DIC) microscopy  
([www.canisius.edu/biology/cell\\_imaging/gallery.asp](http://www.canisius.edu/biology/cell_imaging/gallery.asp))



« un réseau »...

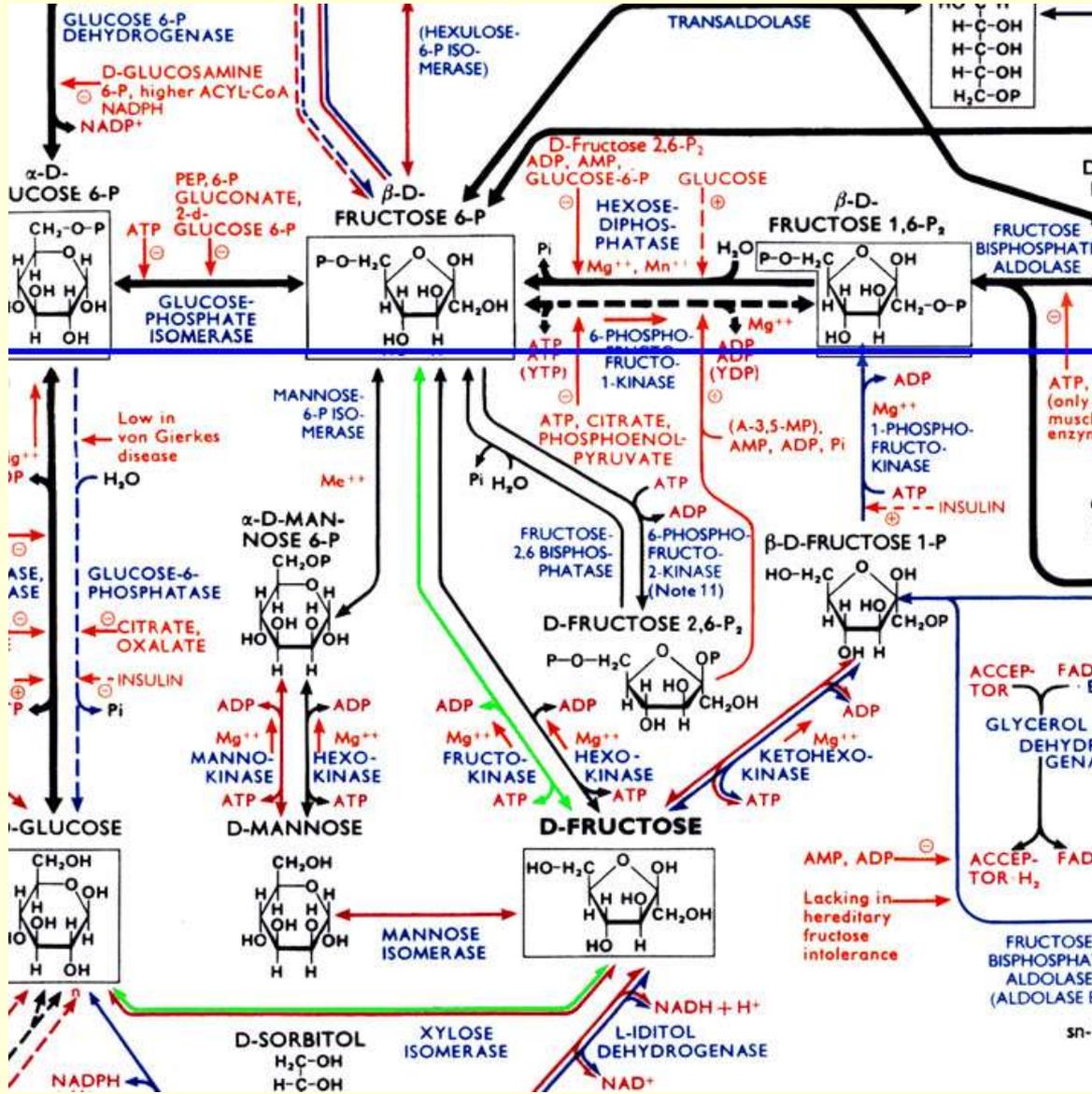
= des éléments qui entretiennent des relations

Et dans ce réseau, il y a **constance de la structure** générale malgré le changement de ses éléments constitutants.

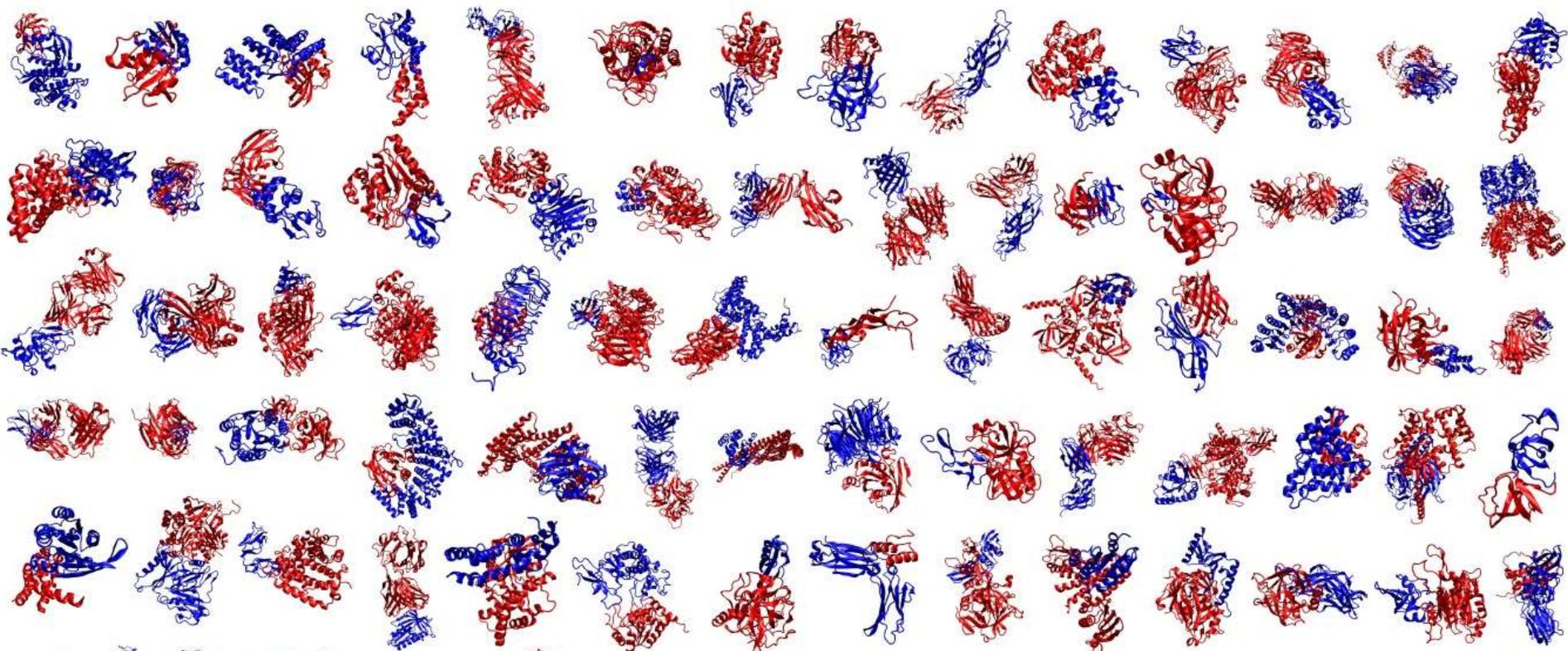
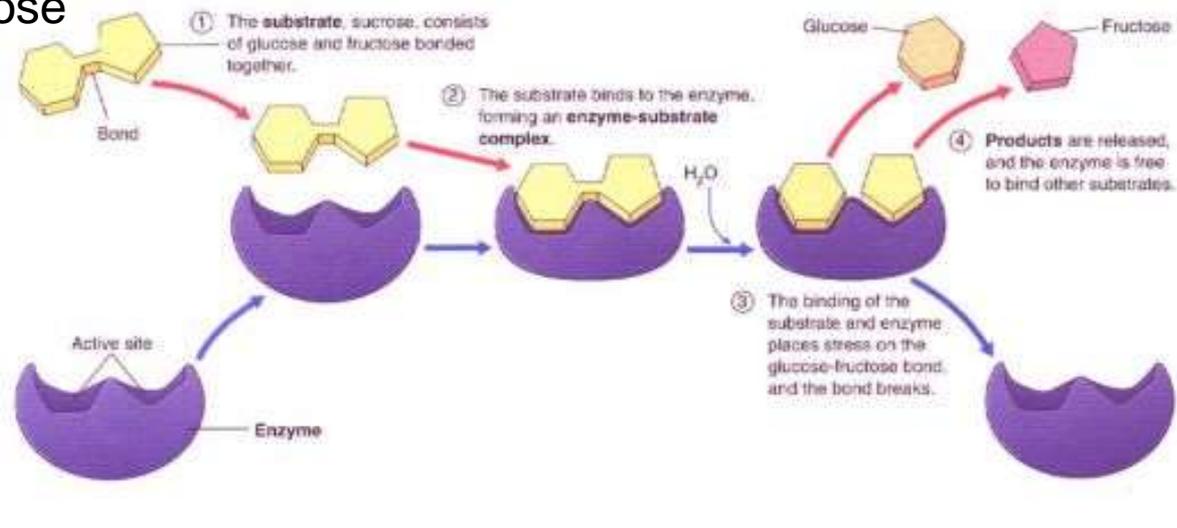


« un réseau complexe »... = cascades de réactions biochimiques dans une cellule

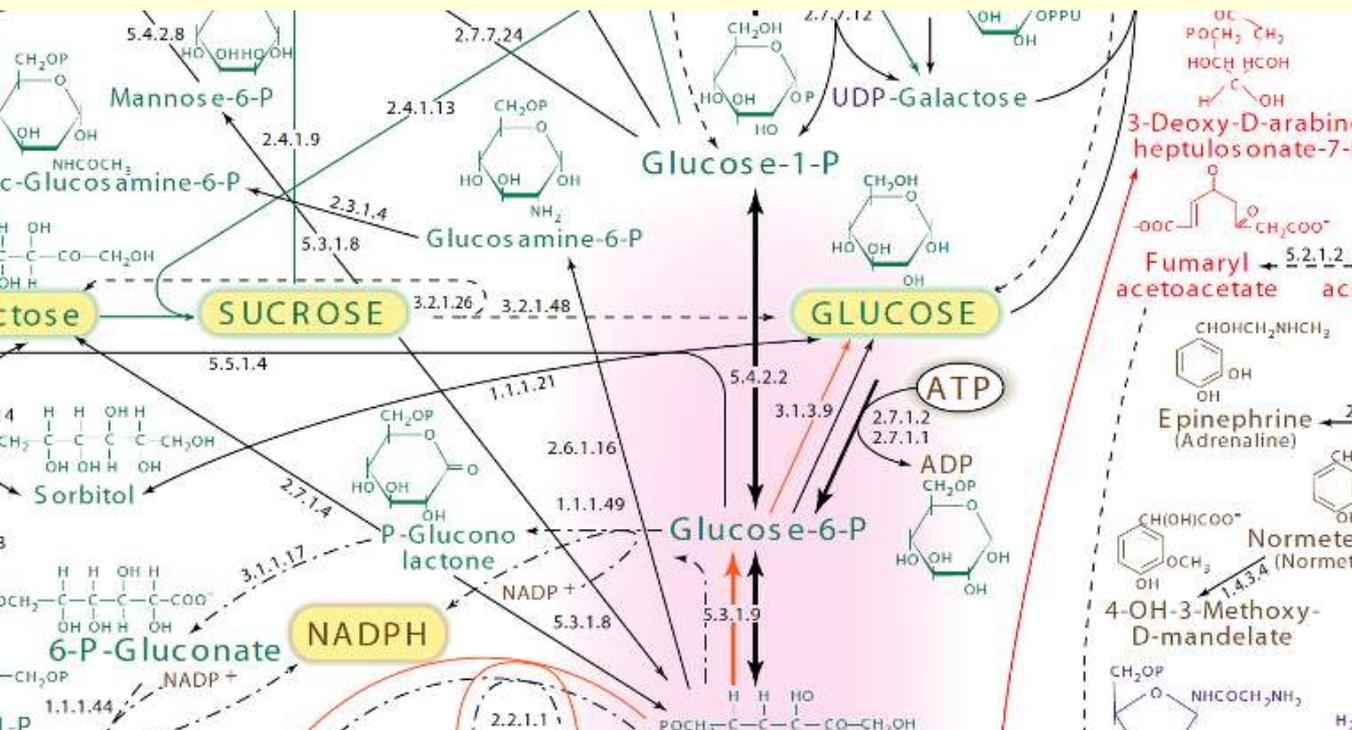
« un réseau complexe d'éléments »... : enzymes (protéines), ADN, etc.



# sucrose



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



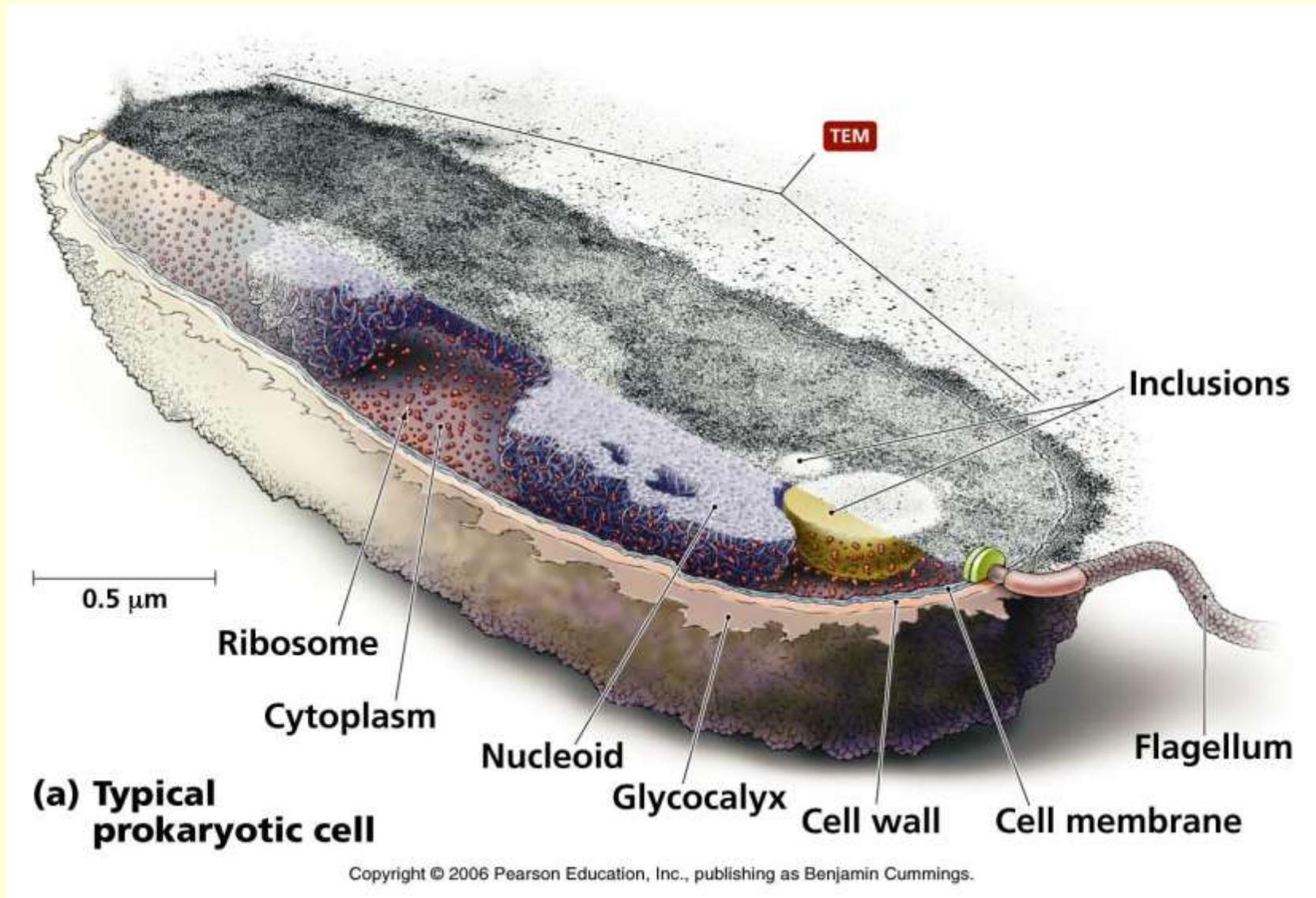
..qui régénèrent constamment, par leurs interactions et transformations, le réseau qui les a produits.



« 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.

Les premières cellules vivante sont déjà infiniment complexes !



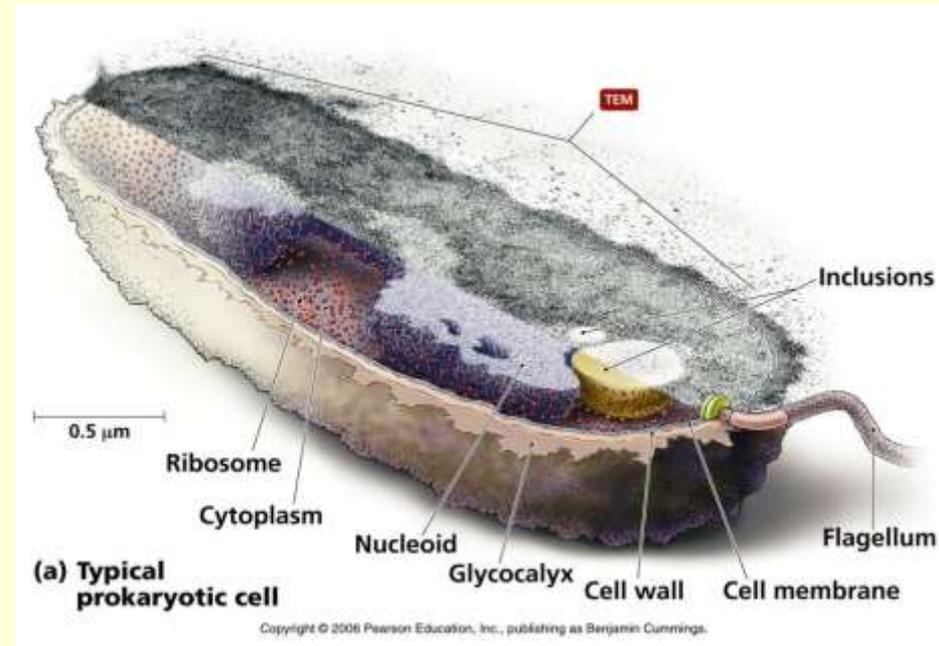
À un certain niveau d'organisation,

on voit donc apparaître un « **agent autonome** » avec une **identité** propre.

Cet agent autonome découle d'interactions dynamiques au niveau **local** (les interactions moléculaires de son métabolisme, par exemple)

ET

de processus émergents qui apparaissent à un niveau **global**.

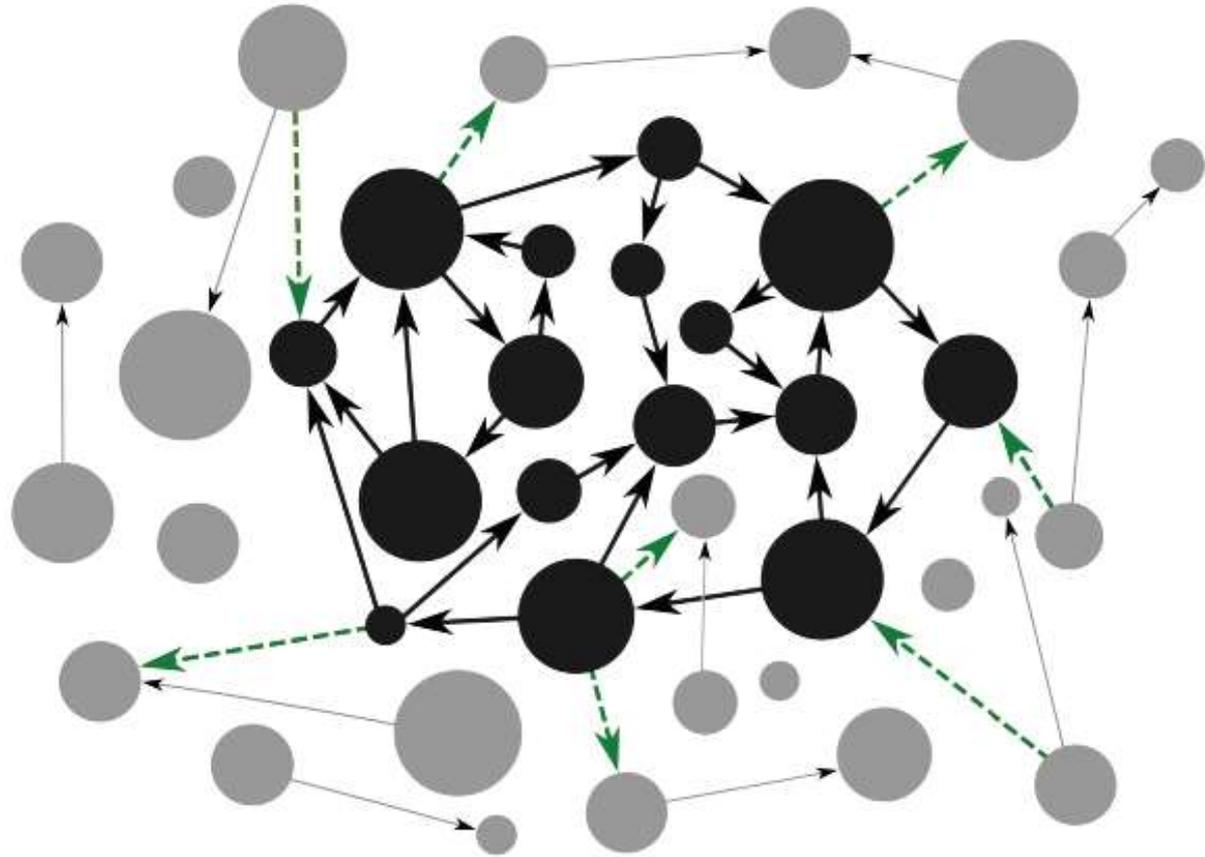


**En noir** : une cellule

dont les différentes  
composantes  
moléculaires  
interagissent  
**localement** et  
préférentiellement  
entre elles

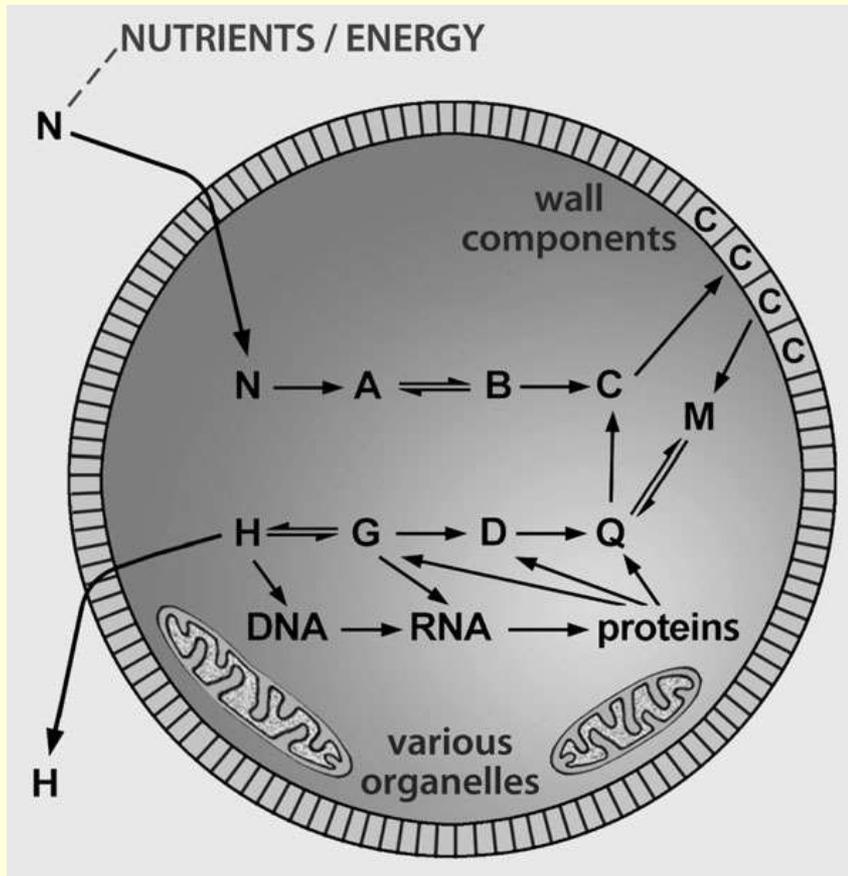
(mais c'est  
un « système ouvert »  
du point de vue  
thermodynamique,

i.e. de l'énergie entre  
et des « déchets »  
sortent)



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)

<http://www.gaillard-systemique.com/autopoiese-varela>



Il n'y a pas d'endroit particulier qui pourrait être associé à un "centre de la vie" à l'intérieur de la cellule (pas plus qu'il n'y a de "centre de" quoi que ce soit dans le cerveau...)

Car la vie n'est pas localisée.

C'est une propriété globale qui **émerge des interactions collectives du réseau** des composants moléculaires qui forment la cellule.

**La vie est un processus émergent** qui n'est pas présent dans les parties mais dans les interactions dynamiques au sein du tout que forment ces parties.

Ces propriétés émergentes sont parfois étonnantes  
(comme la vie) ou comme cet exemple en chimie :



+



=



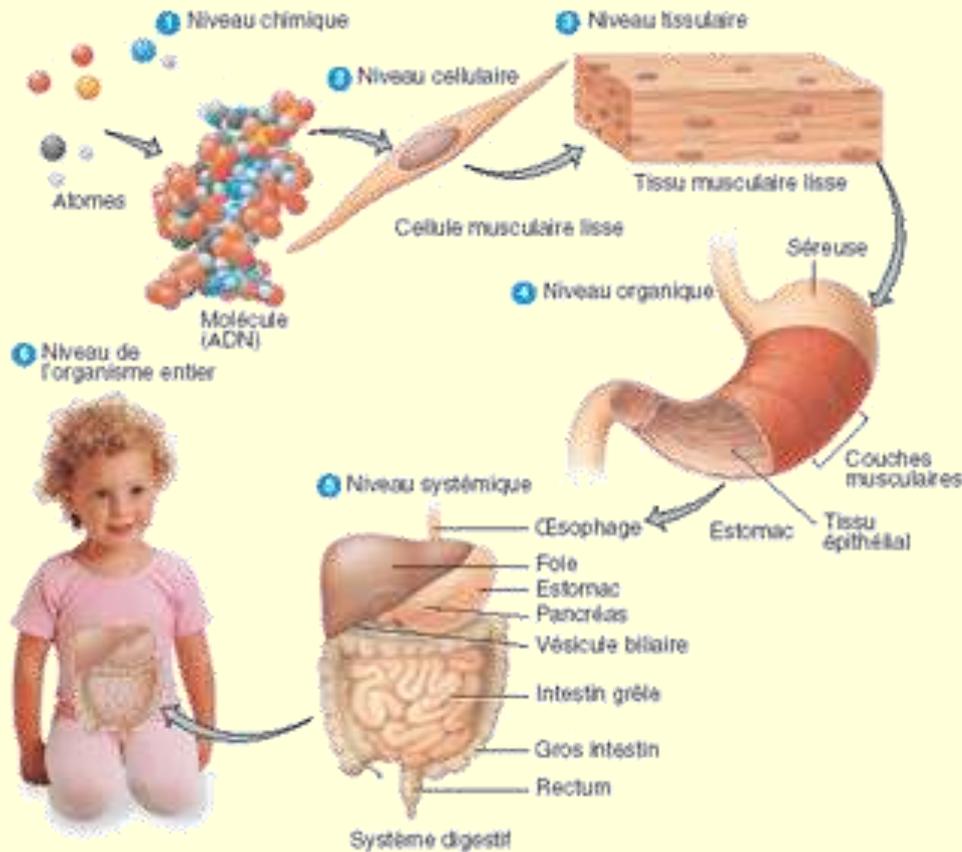
Sodium (Na)  
(métal hautement inflammable)

Chlore (Cl)  
(gaz très toxique)

Chlorure de sodium (NaCl)  
(sel de table,  
parfaitement comestible)

La conscience par rapport au système nerveux  
en est un autre pas moins étonnant...

Organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)

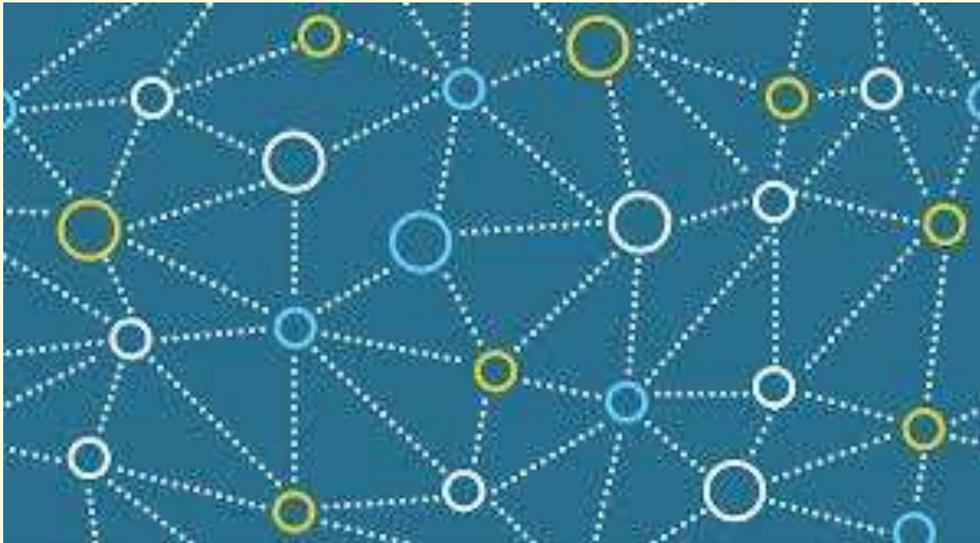


Une conséquence importante :

L'approche **réductionniste** en science où l'on cherche à réduire le tout en ses parties pour mieux le comprendre n'est applicable que lorsqu'on parle de **ce qui compose** la structure du vivant. ("De quoi c'est fait ?")

L'émergence du vivant en tant que **propriété particulière** ne peut donc pas être réduite aux propriétés de ses constituants chimiques.

Pour comprendre êtres vivants, il faut considérer la forme et les interactions dynamiques globales au sein de ses réseaux.



« Whenever we look at life,  
we look at networks. »

- Capra & Luisi

Un conséquence importante :

L'approche **réductionniste** en science où l'on cherche à réduire le tout en ses parties pour mieux le comprendre n'est applicable que lorsqu'on parle de **ce qui compose** la structure du vivant.  
("De quoi c'est fait ?")

L'émergence du vivant en tant que **propriété particulière** ne peut donc pas être réduit aux propriétés de ses constituants chimiques.

Un avant-goût de vers où on s'en va...

Physics/  
Chemistry



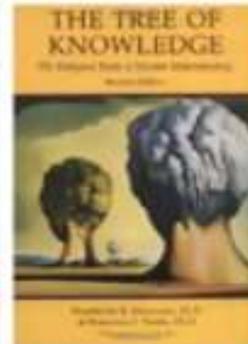
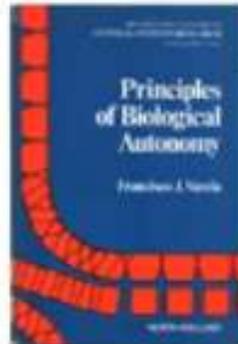
Biology



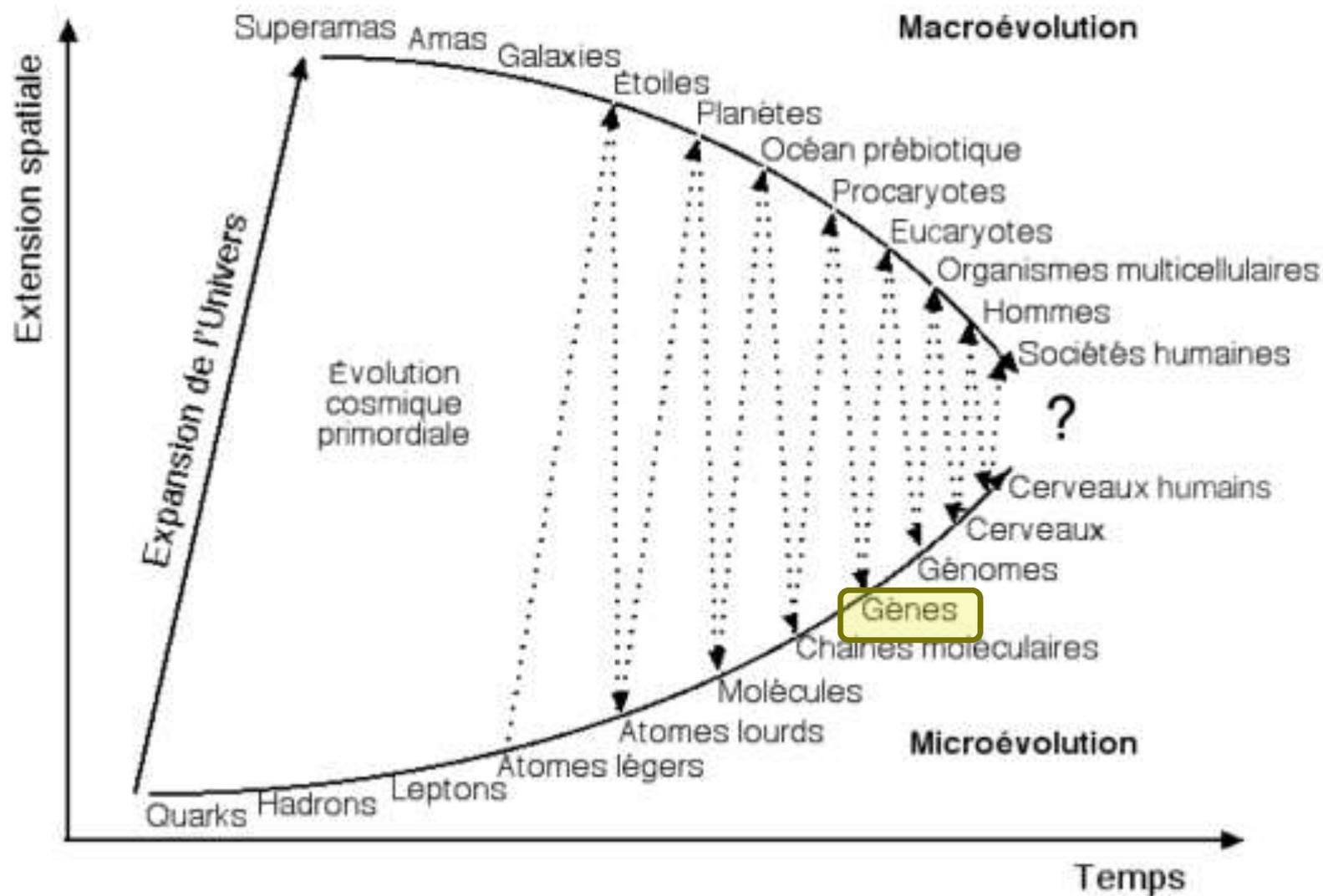
Cognition

AUTOPOIESIS

BIOLOGY OF  
COGNITION

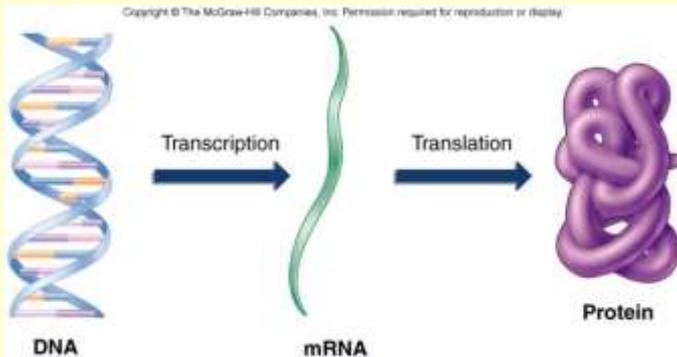


ENSO2018/Beer

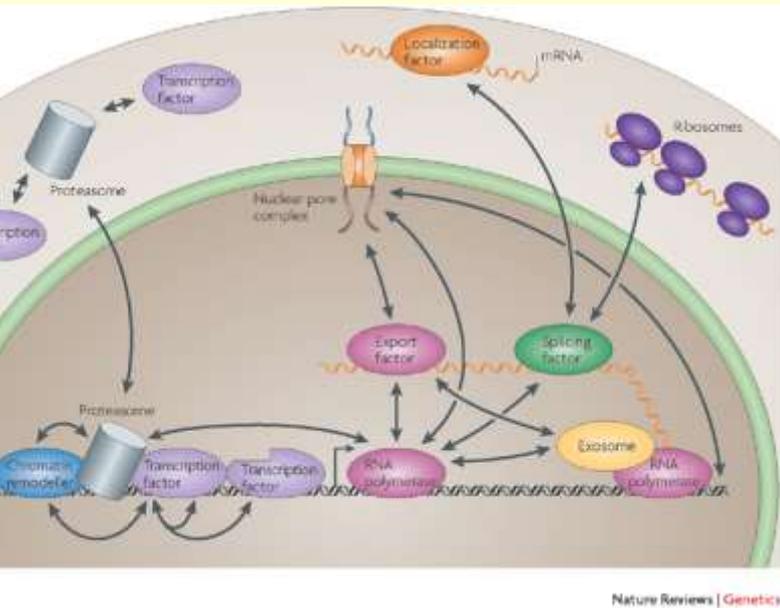


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

Et ça se vérifie déjà au niveau du gène...

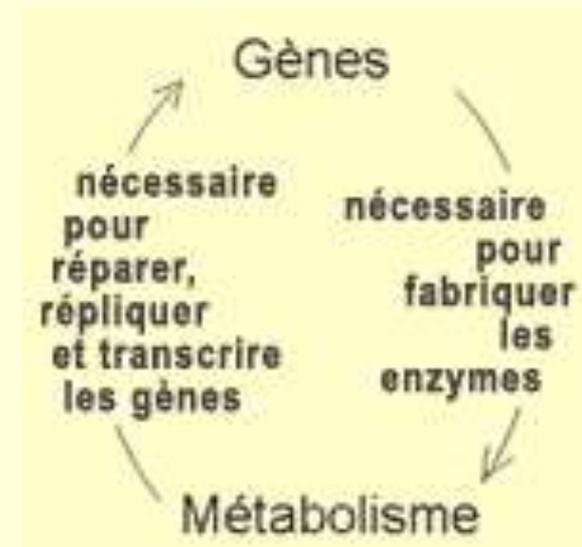


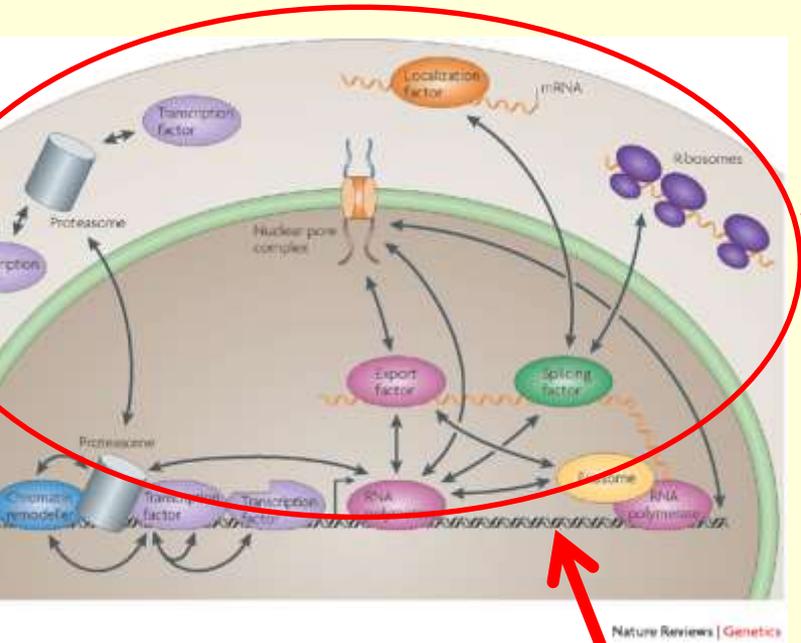
On a longtemps pensé que les gènes n'étaient que les « plans » pour fabriquer nos protéines.



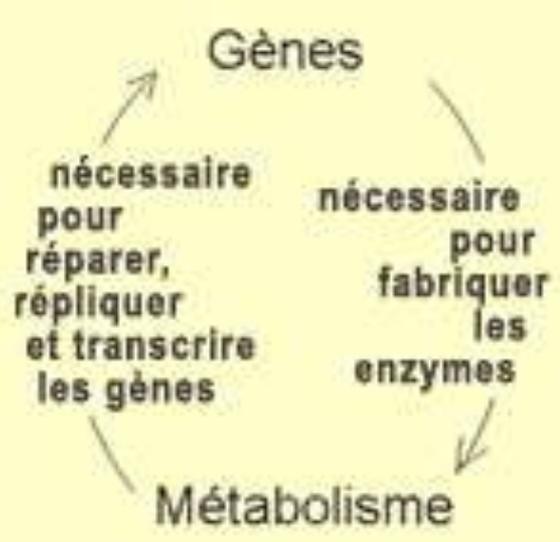
Mais on sais maintenant que certains gènes servent à fabriquer des **enzymes** (qui sont des protéines...) qui vont revenir se fixer sur d'autres gènes et en influencer l'expression.

Dans l'autopoïèse, le **métabolisme** et les **gènes** forment ensemble un réseau.





Nature Reviews | Genetics



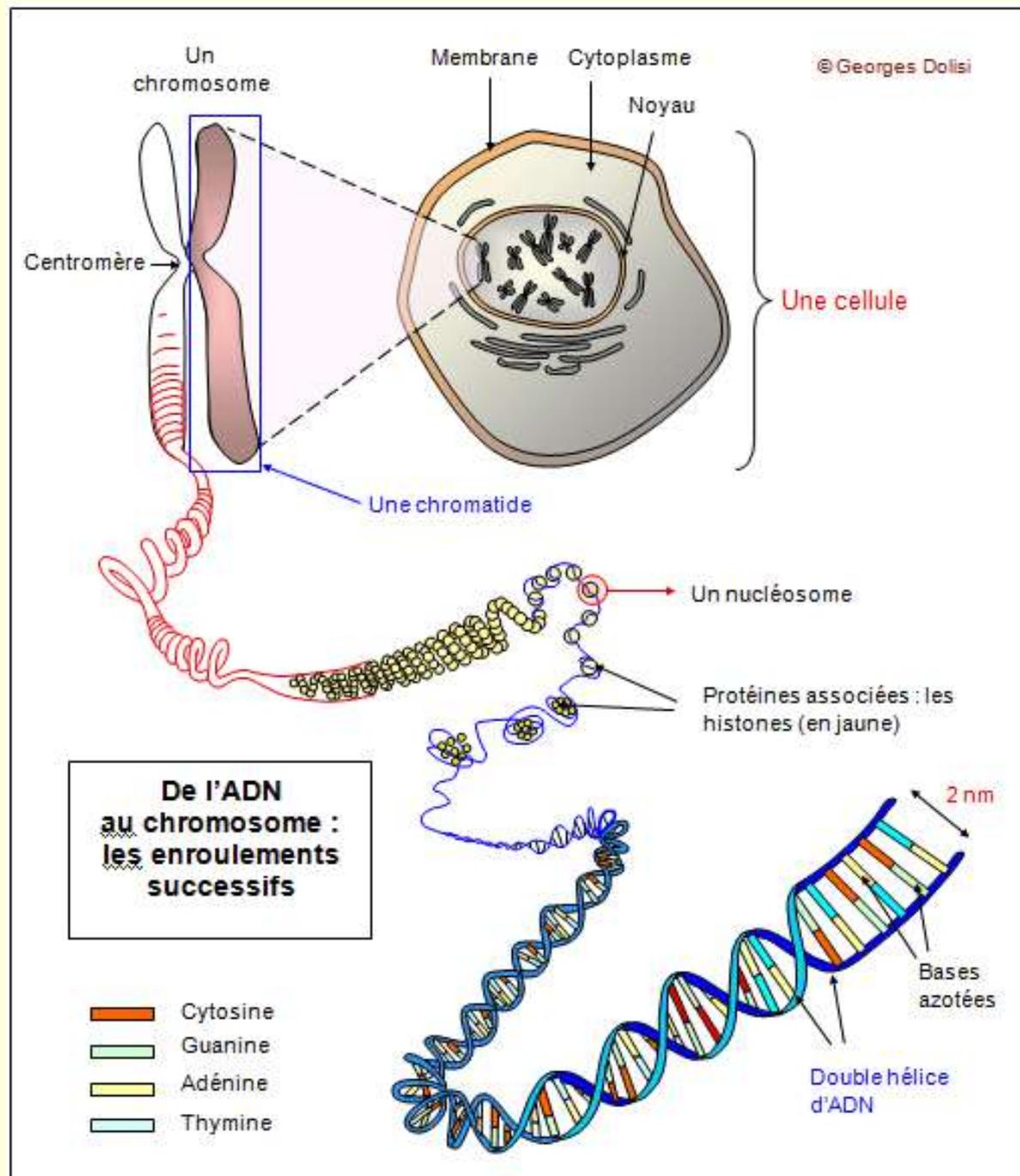
Ces réseaux métaboliques doivent cependant réussir à **se reproduire en faisant des copies d'eux-mêmes.**

Car la vie implique aussi une capacité de **mémoire** pour retenir les bons coups du hasard.

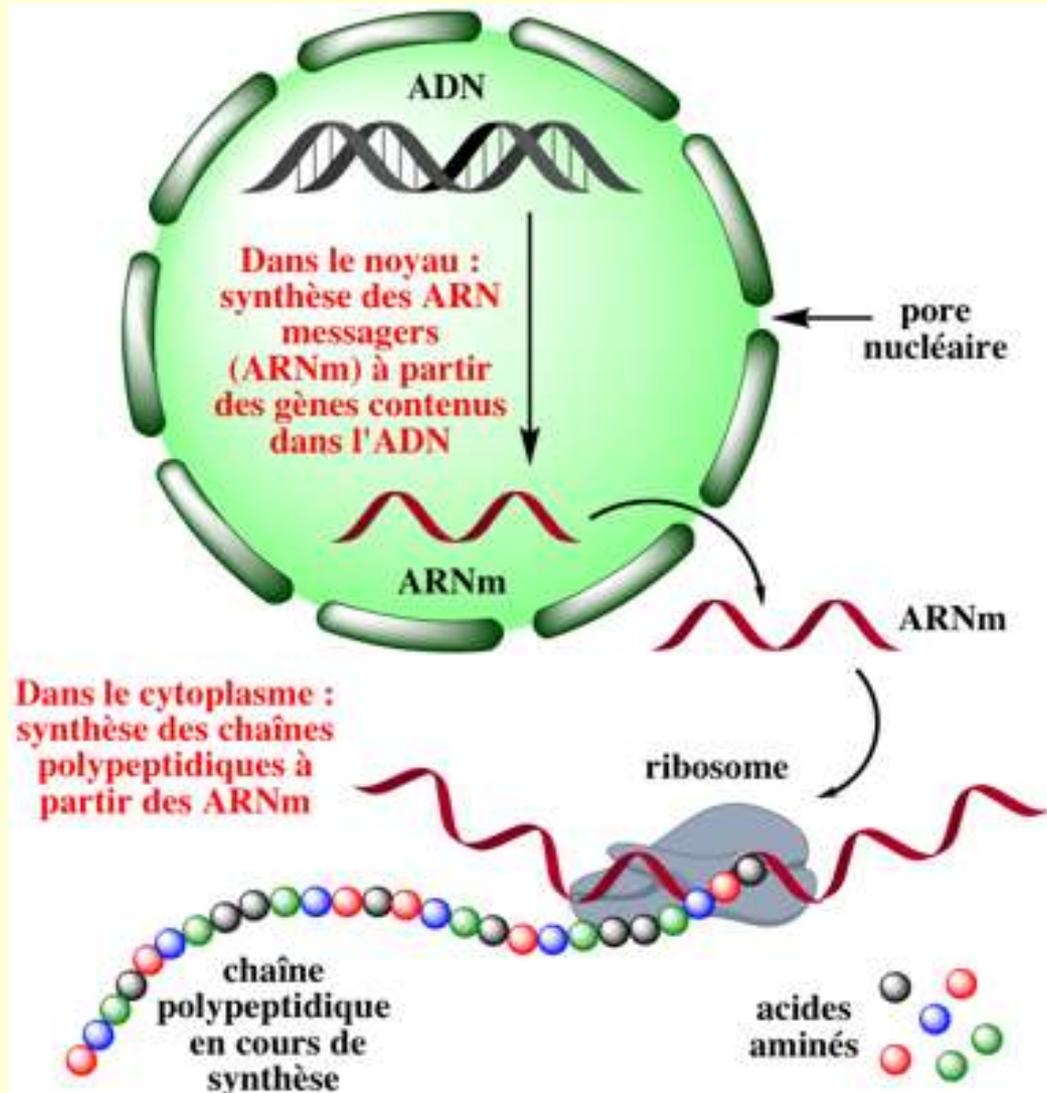
C'est ce que fait l'ADN, cette **longue** molécule relativement **stable** située dans le noyau de chacune de nos cellules.

Mais cette stabilité ne lui confère pas un statut particulier vis-à-vis des autres molécules :

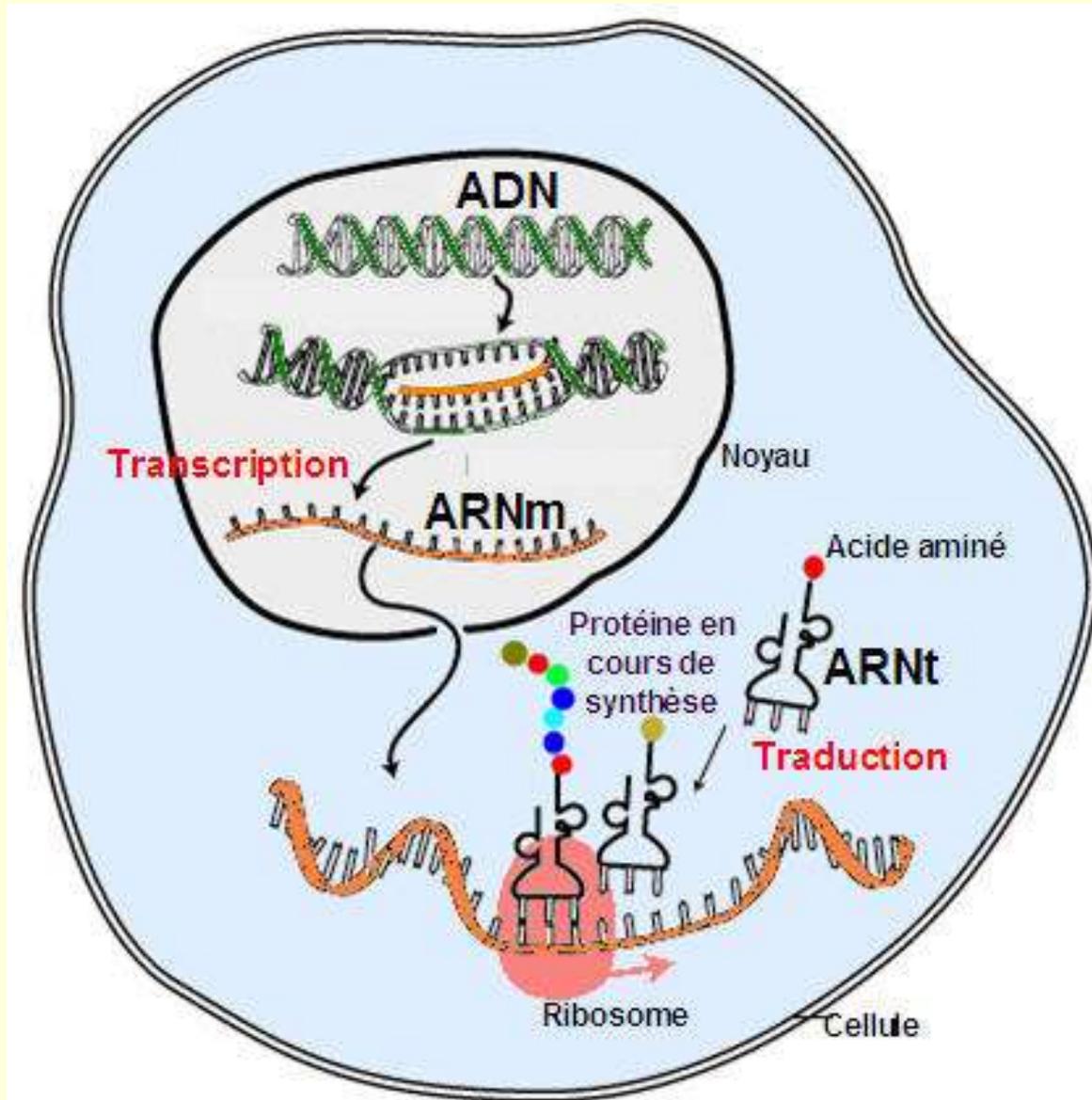
l'ADN fait partie d'un **réseau complexe d'interactions moléculaires.**



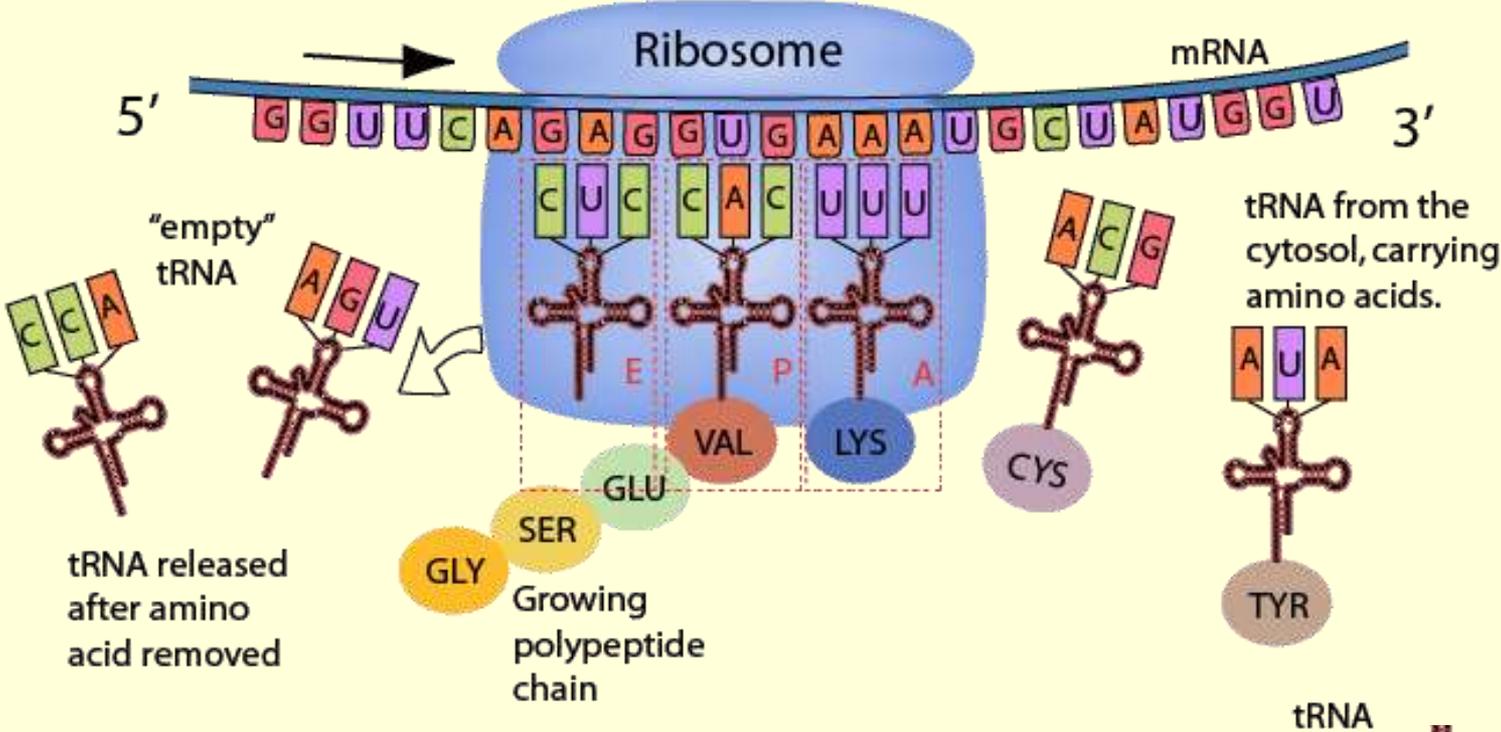
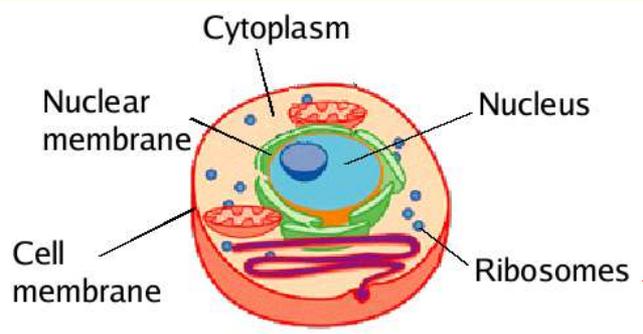
Simple aperçu de la **transcription** de l'ADN en ARNm (dans le noyau), puis de la **traduction** de l'ARNm en protéine (dans le cytoplasme)



Simple aperçu de la **transcription** de l'ADN en ARNm (dans le noyau), puis de la **traduction** de l'ARNm en protéine (dans le cytoplasme)



Simple aperçu de la **transcription** de l'ADN en ARNm (dans le noyau), puis de la **traduction** de l'ARNm en protéine (dans le cytoplasme)



# le code génétique

		Deuxième lettre								ijk
		U		C		A		G		
Première lettre (côté 5')	U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U
		UUC	Phe	UCC	Ser	UAC	Tyr	UGC	Cys	C
		UUA	Leu	UCA	Ser	UAA	Stop	UGA	Stop	A
		UUG	Leu	UCG	Ser	UAG	Stop	UGG	Trp	G
	C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg	U
		CUC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg	C
		CUA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg	A
		CUG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg	G
	A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U
		AUC	Ile	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser	C
		AUA	Ile	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg	A
		AUG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg	G
	G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly	U
		GUC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly	C
		GUA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly	A
		GUG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly	G
		codon d'initiation				codon de terminaison				

Troisième lettre (côté 3')

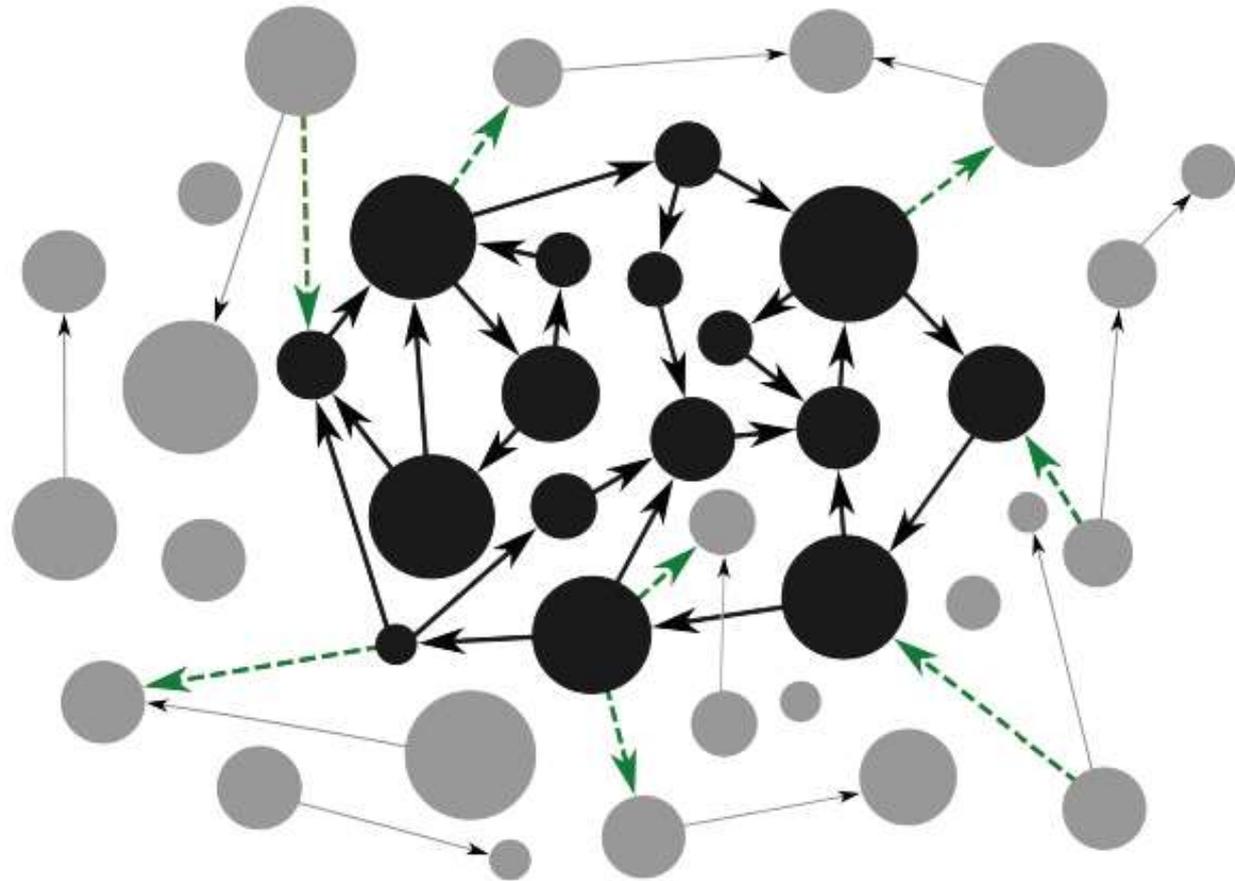
**En noir :**

un réseau de plusieurs **gènes**

et leurs **promoteurs**

impliqués dans le  
moindre comportement

(il est extrêmement  
rare de trouver un gène  
unique correspondant à  
un trait comportemental  
unique)



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)



# BEHAVE

THE BIOLOGY  
of HUMANS at OUR  
BEST and WORST



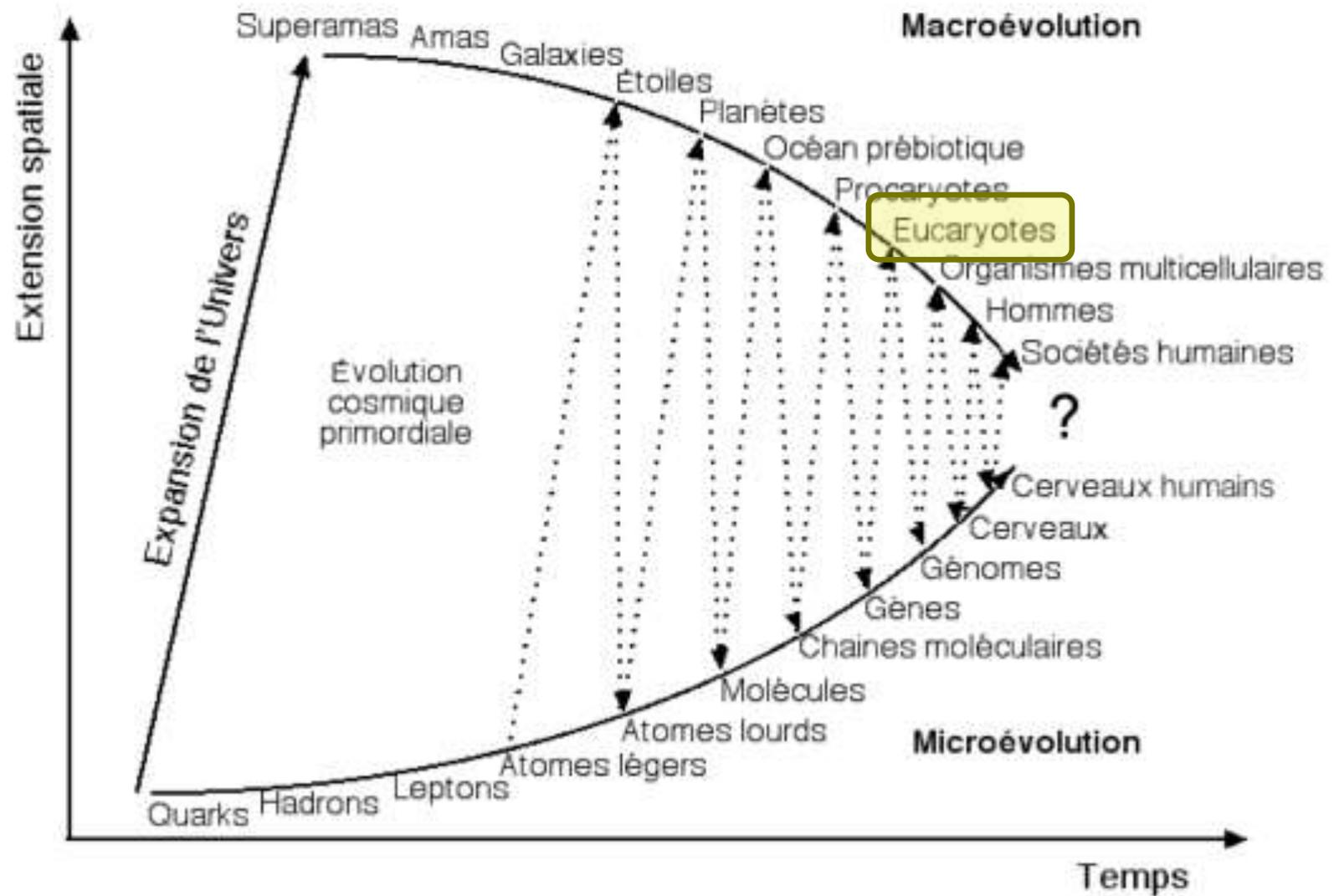
ROBERT M.  
SAPOLSKY

TED video :

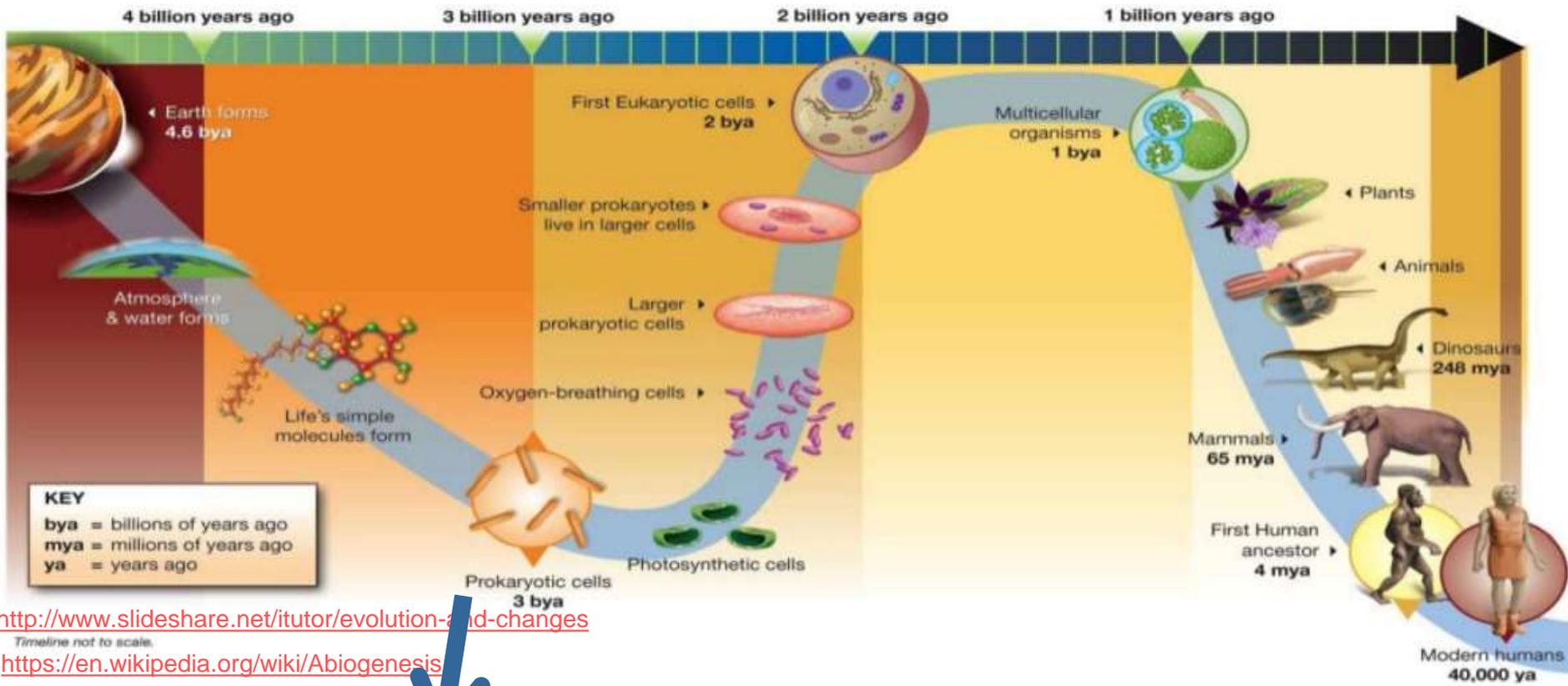
## The biology of our best and worst selves.

[https://www.ted.com/talks/robert\\_sapolsky\\_the\\_biology\\_of\\_our\\_best\\_and\\_worst\\_selves](https://www.ted.com/talks/robert_sapolsky_the_biology_of_our_best_and_worst_selves)

- a. This review of candidate genes barely scratches even the surface of the surface. Go on PubMed (a major search engine of the biomedical literature) and search “MAO gene/behavior”—up come more than 500 research papers. “Serotonin transporter gene/behavior”—1,250 papers. “Dopamine receptor gene/behavior”—nearly 2,000.
- b. The candidate gene approaches show that the effect of a single gene on a behavior is typically tiny. In other words, having the “warrior gene” variant of MAO probably has less effect on your behavior than does believing that you have it.
- c. Genomewide survey approaches show that these behaviors are influenced by huge numbers of genes, each one playing only a tiny role.
- d. What this translates into is nonspecificity. For example, serotonin transporter gene variants have been linked to risk of depression, but also anxiety, obsessive-compulsive disorder, schizophrenia, bipolar disorder, Tourette’s syndrome, and borderline personality disorder. In other words, that gene is part of a network of hundreds of genes pertinent to depression, but also part of another equally large and partially overlapping network relevant to anxiety, another relevant to OCD, and so on. And meanwhile, we’re plugging away, trying to understand interactions of two genes at a time.
- e. And, of course, gene and environment, gene and environment.

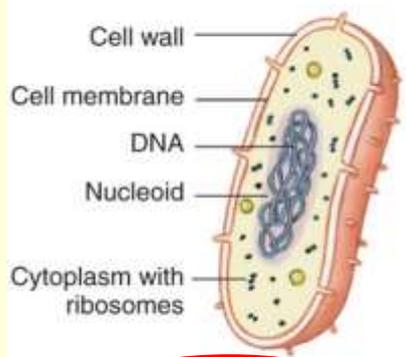


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



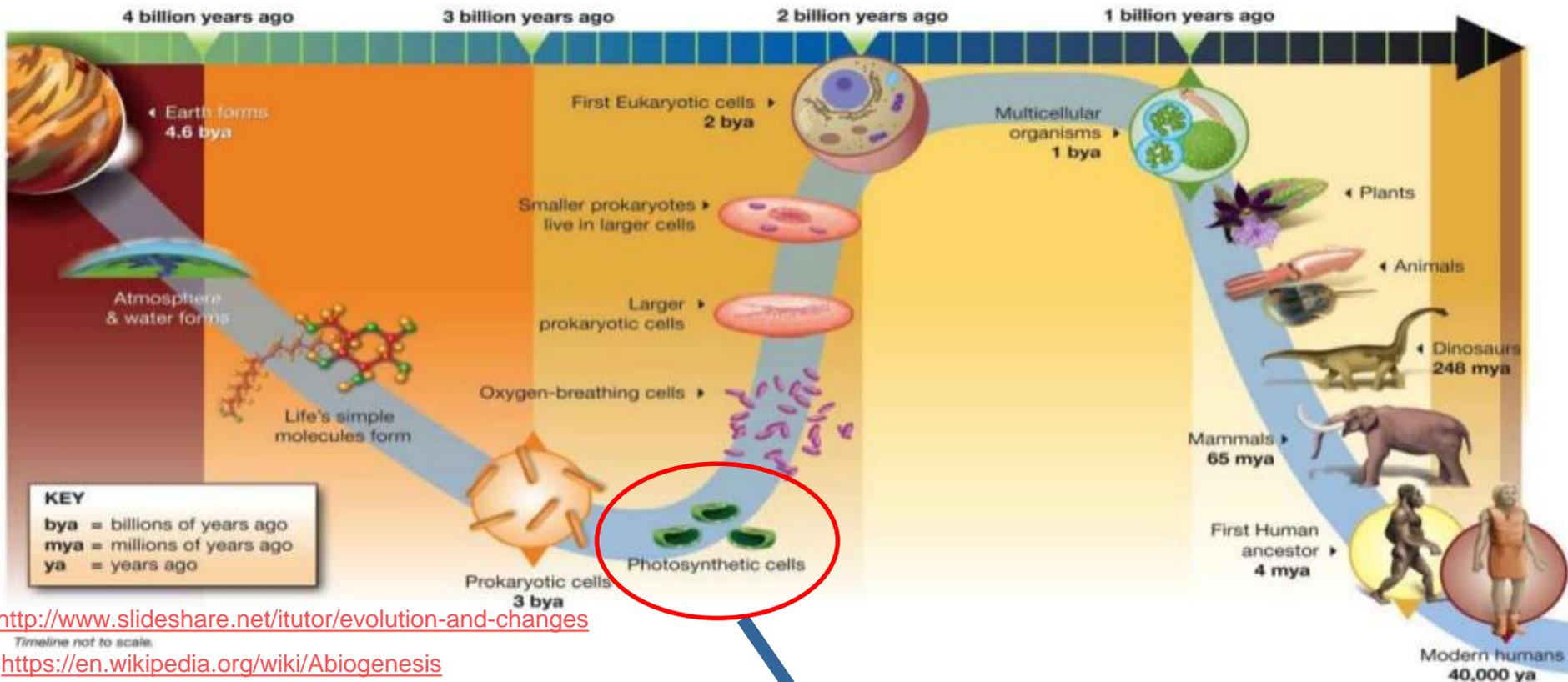
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>



**Prokaryote**

**3,5 bya**

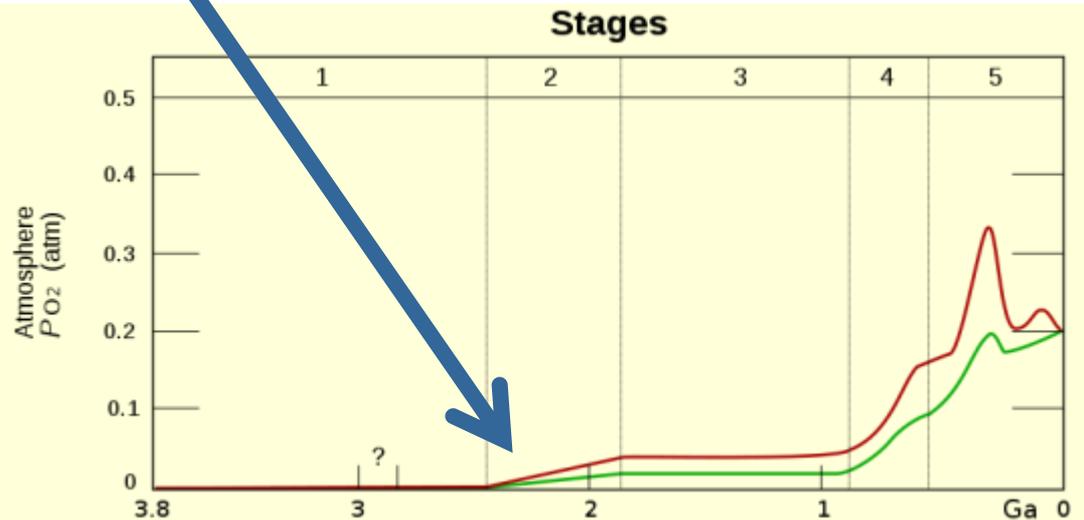


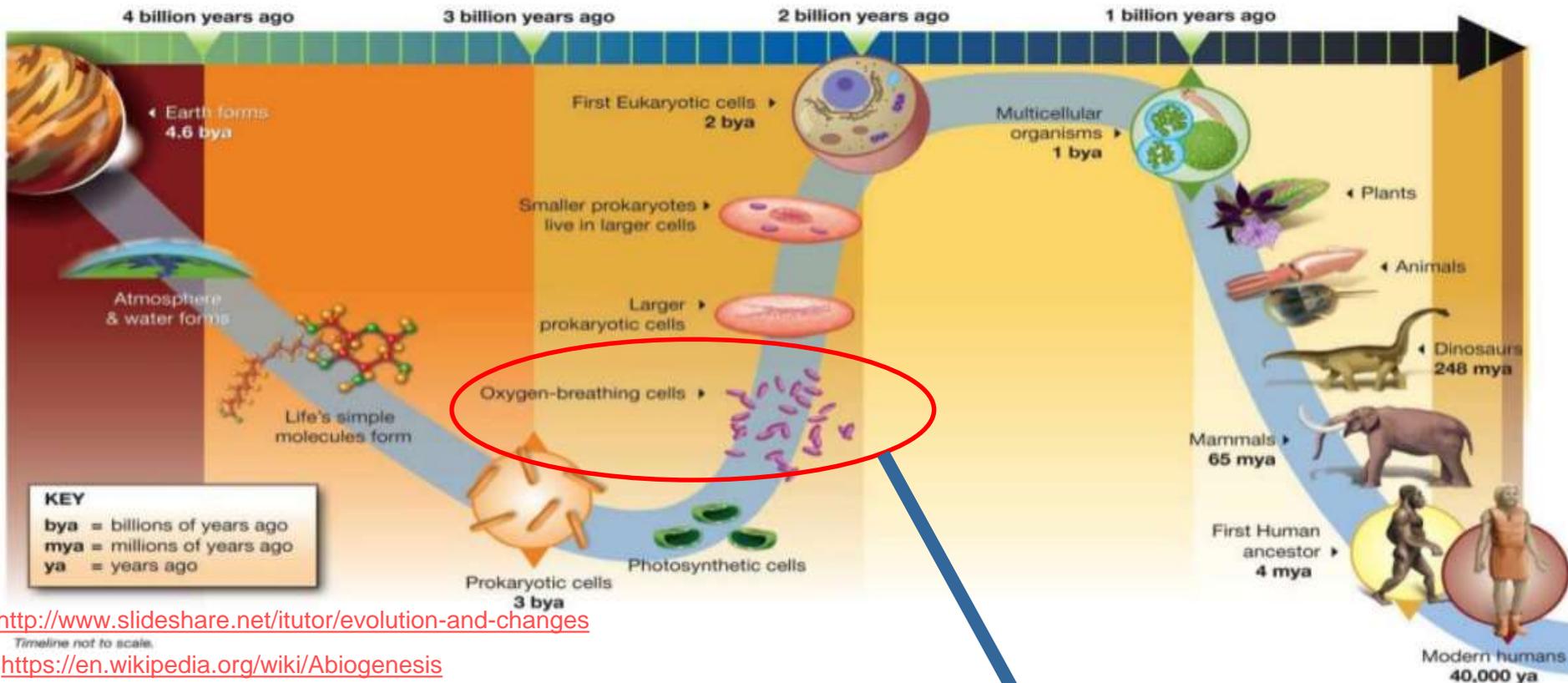
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

**2,4 Ga :**

**La Grande Oxydation**  
(ou catastrophe de l'oxygène)

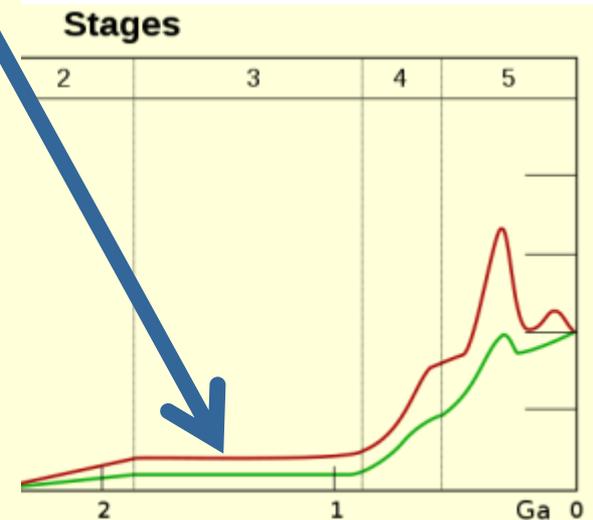


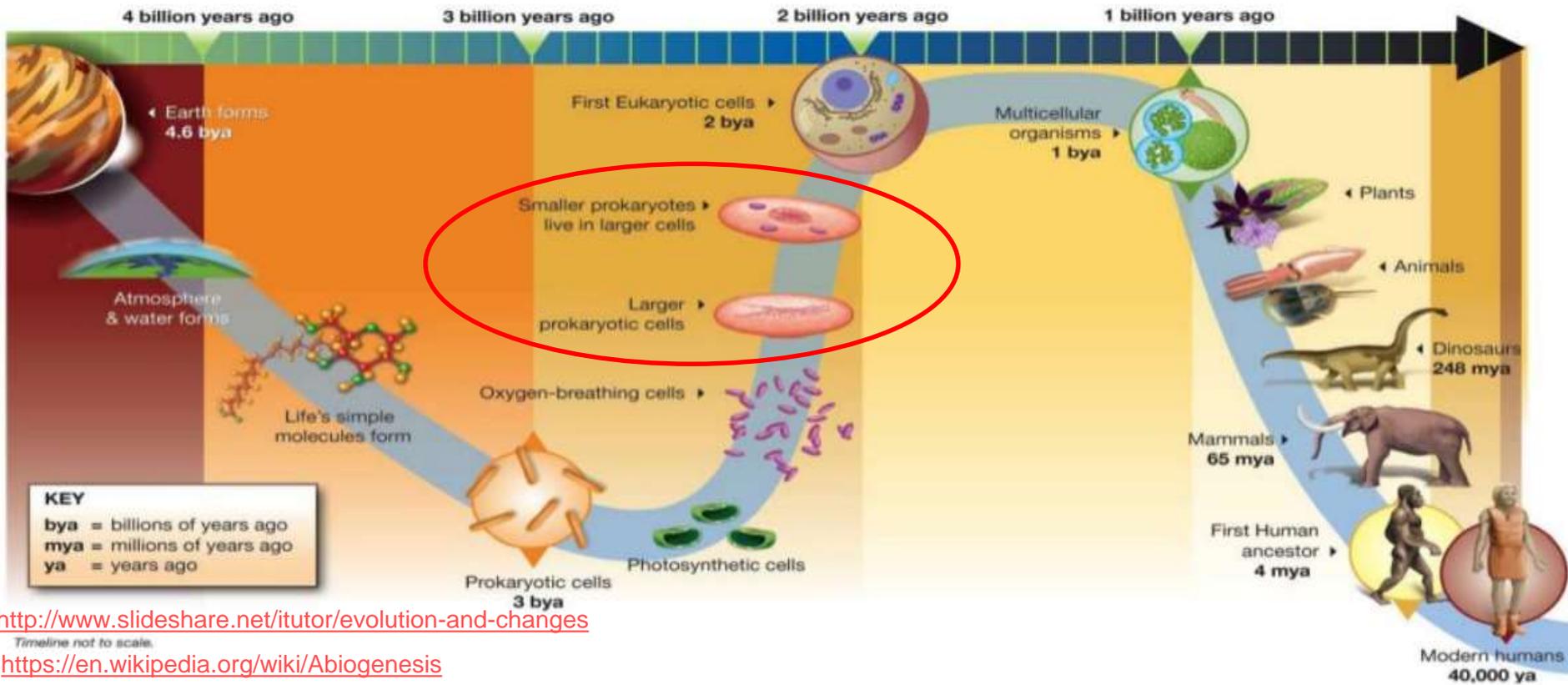


<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

L'avènement de microorganismes capables d'utiliser cet oxygène va faire passer de 5 à 36 la quantité de molécules d'ATP produites à partir d'une molécule de glucose.

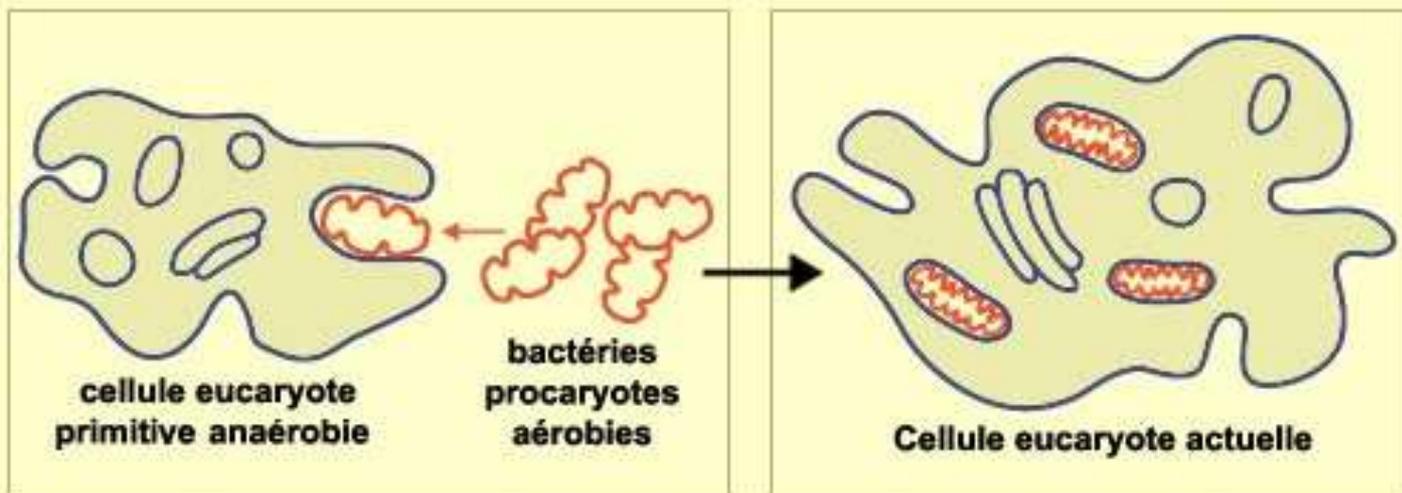




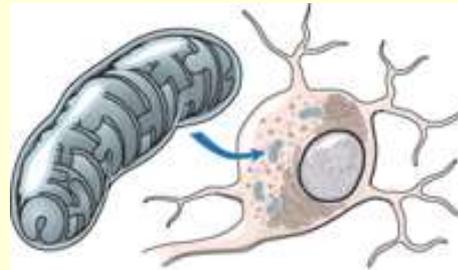
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

*Timeline not to scale.*

<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>



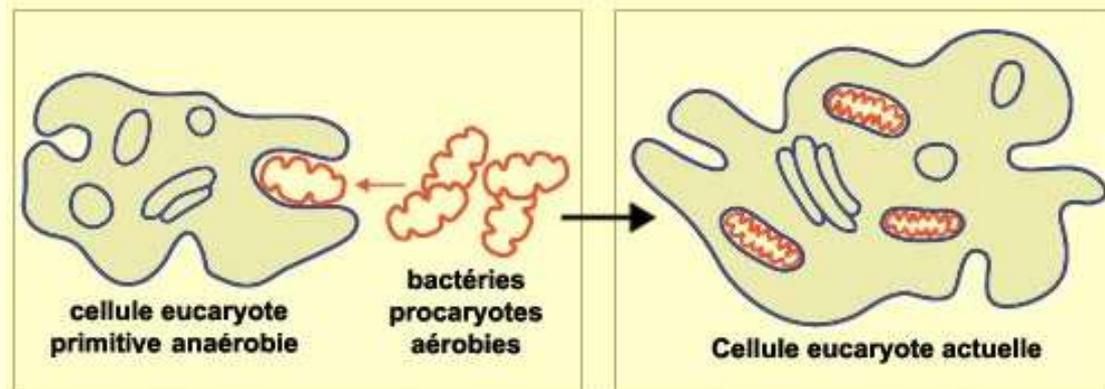
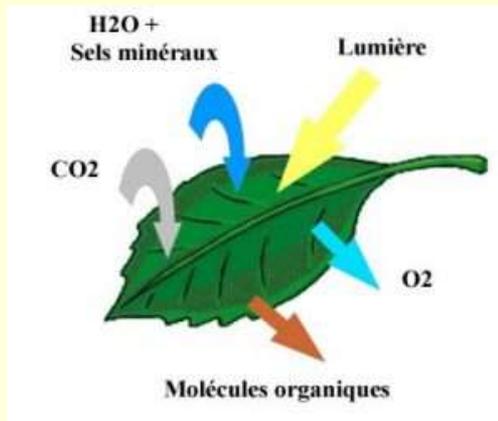
« Pas de mutation à l'origine de la **photosynthèse**  
ou pas relation **symbiotique** cellules eucaryotes - bactéries aérobies  
(qui sont des événements **contingents ou accidentels**),  
pas de neurones si énergivores.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »

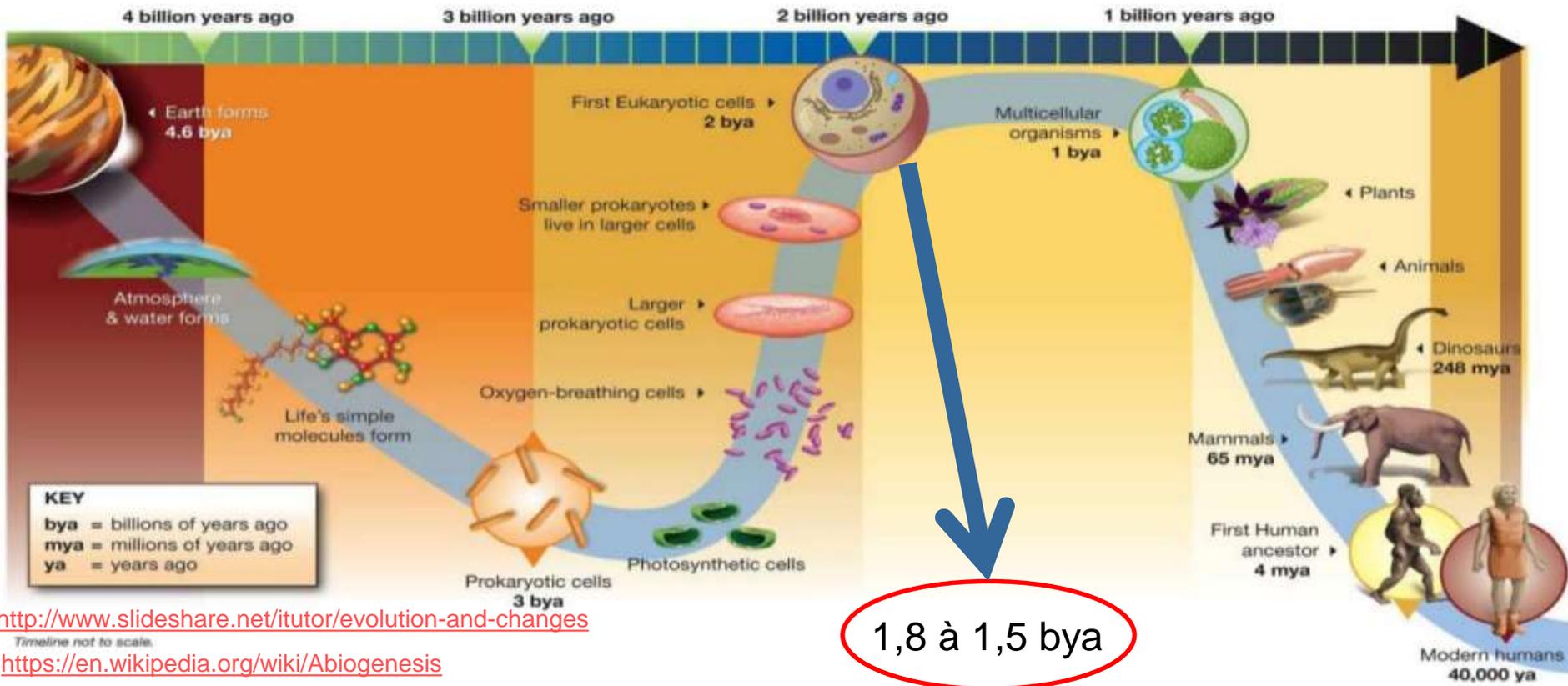


Car encore aujourd'hui,  
chaque cellule de  
votre cerveau possède  
des **mitochondries**  
qui utilisent l'**oxygène**.

What  
Caused  
Life's Major  
Evolutionary  
Transitions?

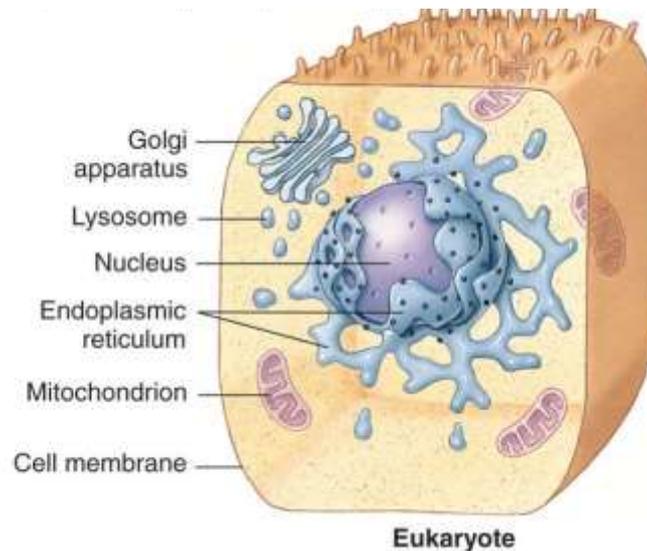
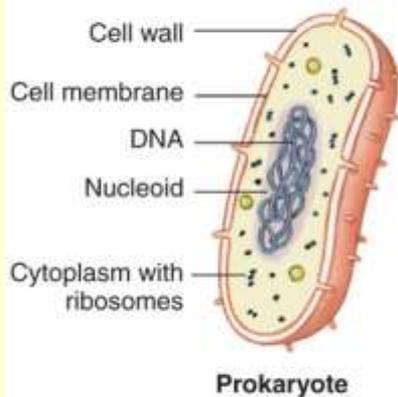
<http://statedclearly.com/videos/what-caused-lifes-major-evolutionary-transitions/>





<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

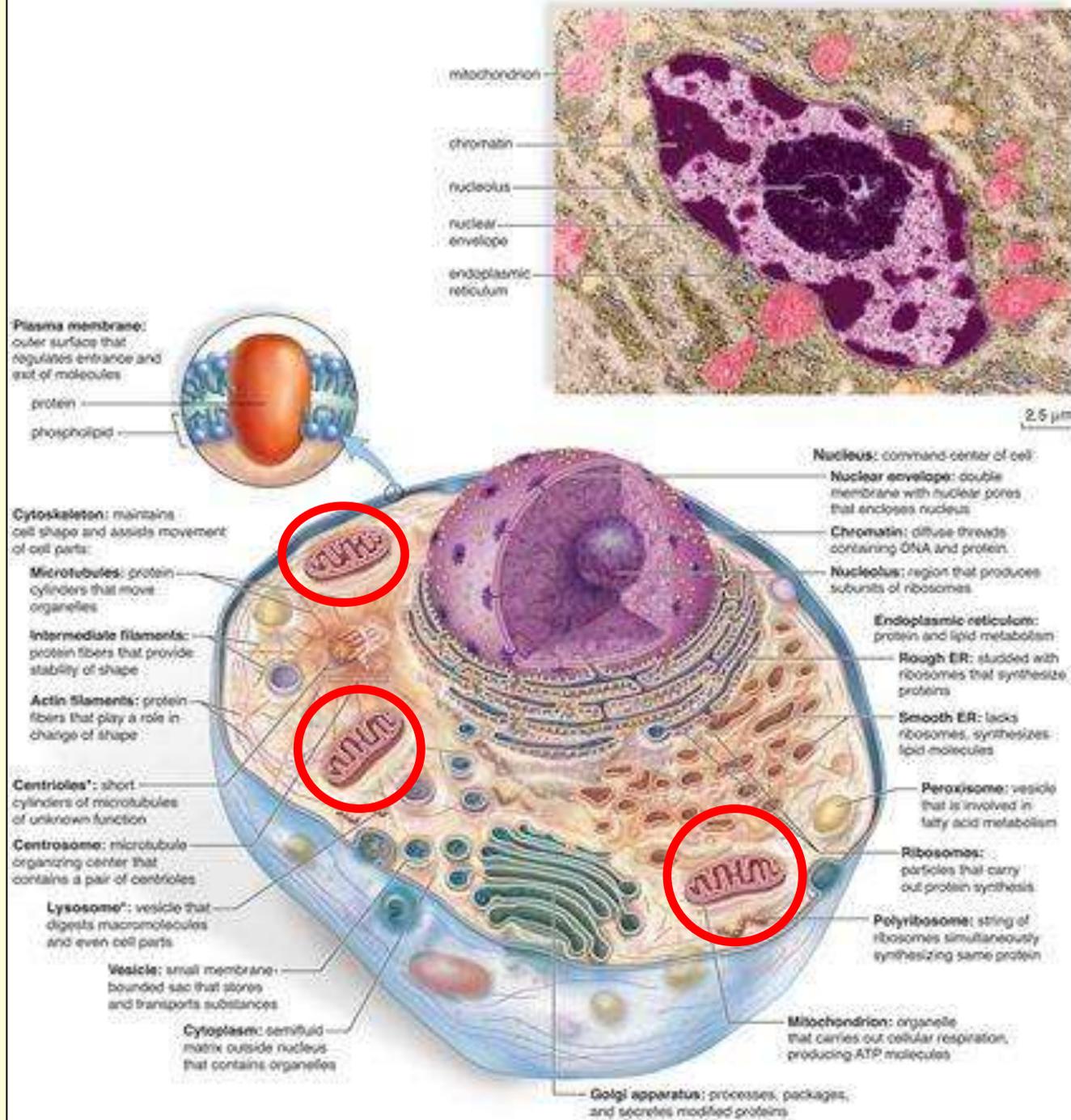
<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>



Les réseaux complexes se « compartimentalisent »

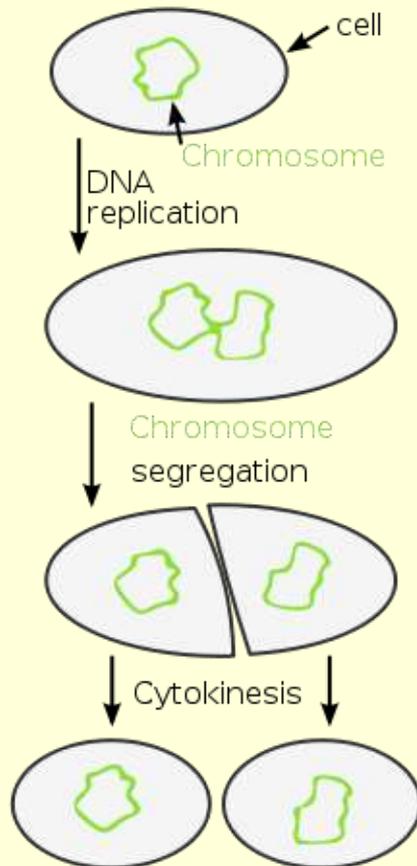
Dans le **noyau**, où se retrouve l'ADN.

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

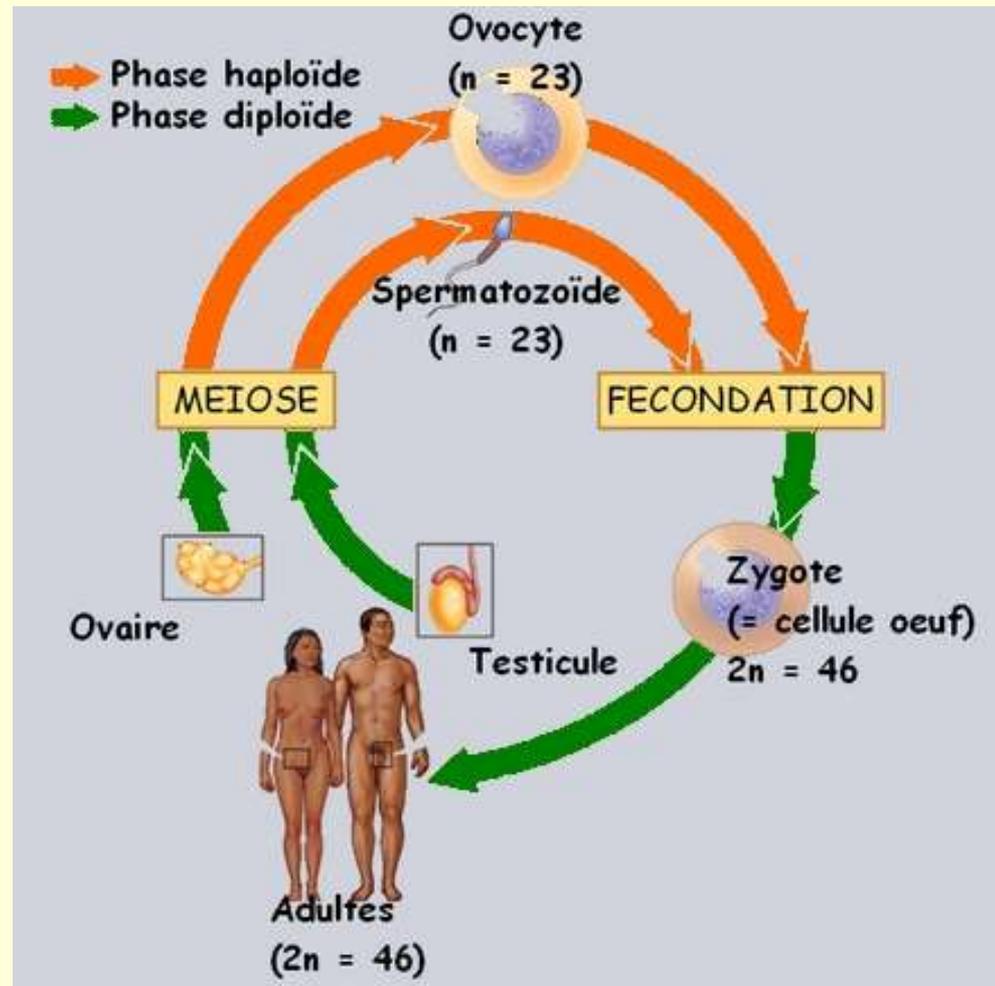


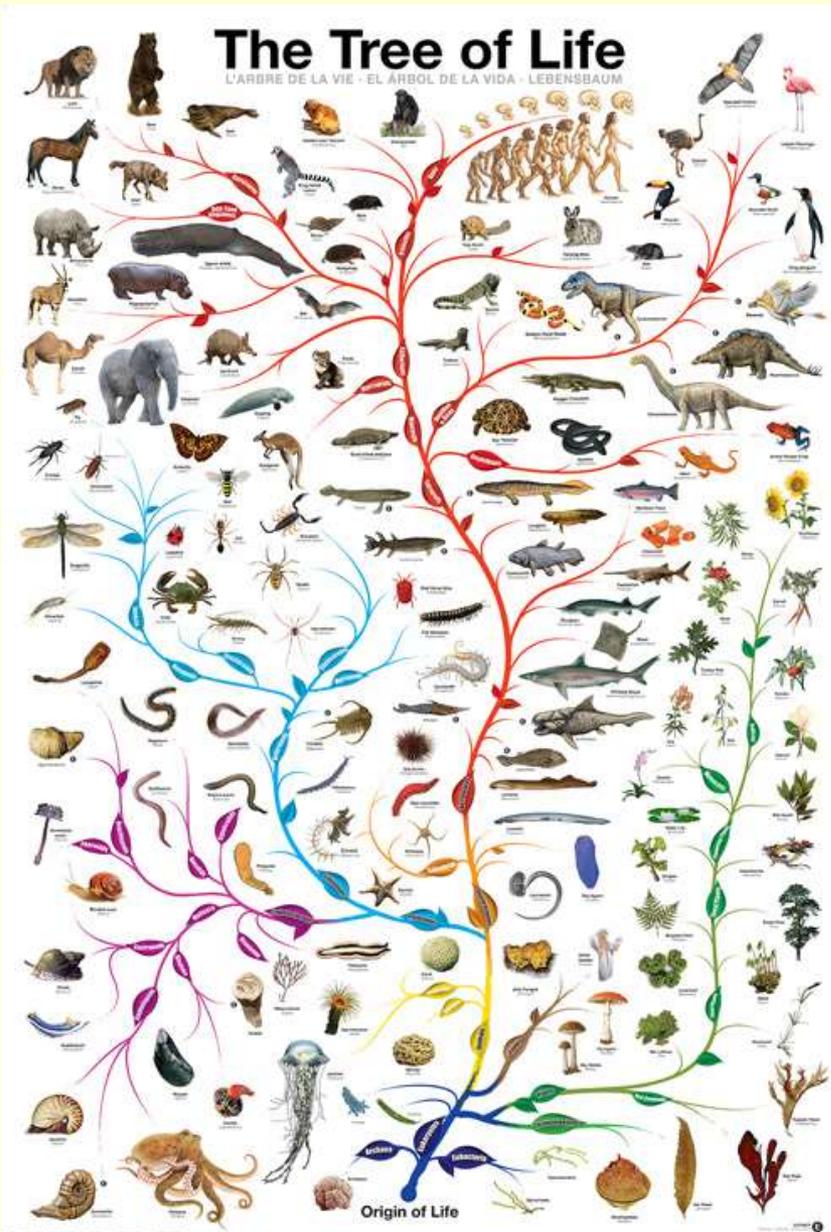
Autre étape importante : apparition de la **reproduction sexuée**, vraisemblablement avec les premiers eucaryotes.

Car avant : multiplication asexuée qui permet à **un** « parent » de se multiplier seul en faisant **deux copies identiques** de lui-même



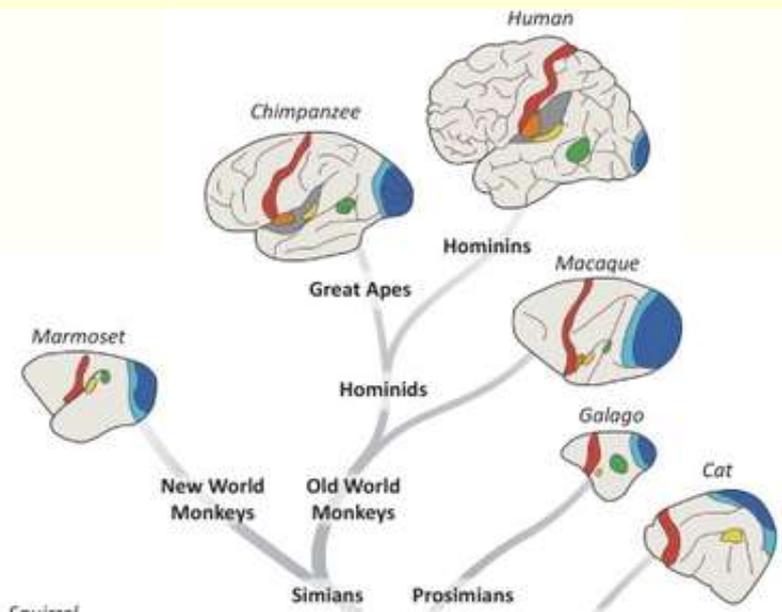
La sexualité : **deux** « parent » se mettent ensemble pour faire **un** individu toujours **différent** grâce au **brassage** du patrimoine génétique (crée beaucoup plus de **diversité**)





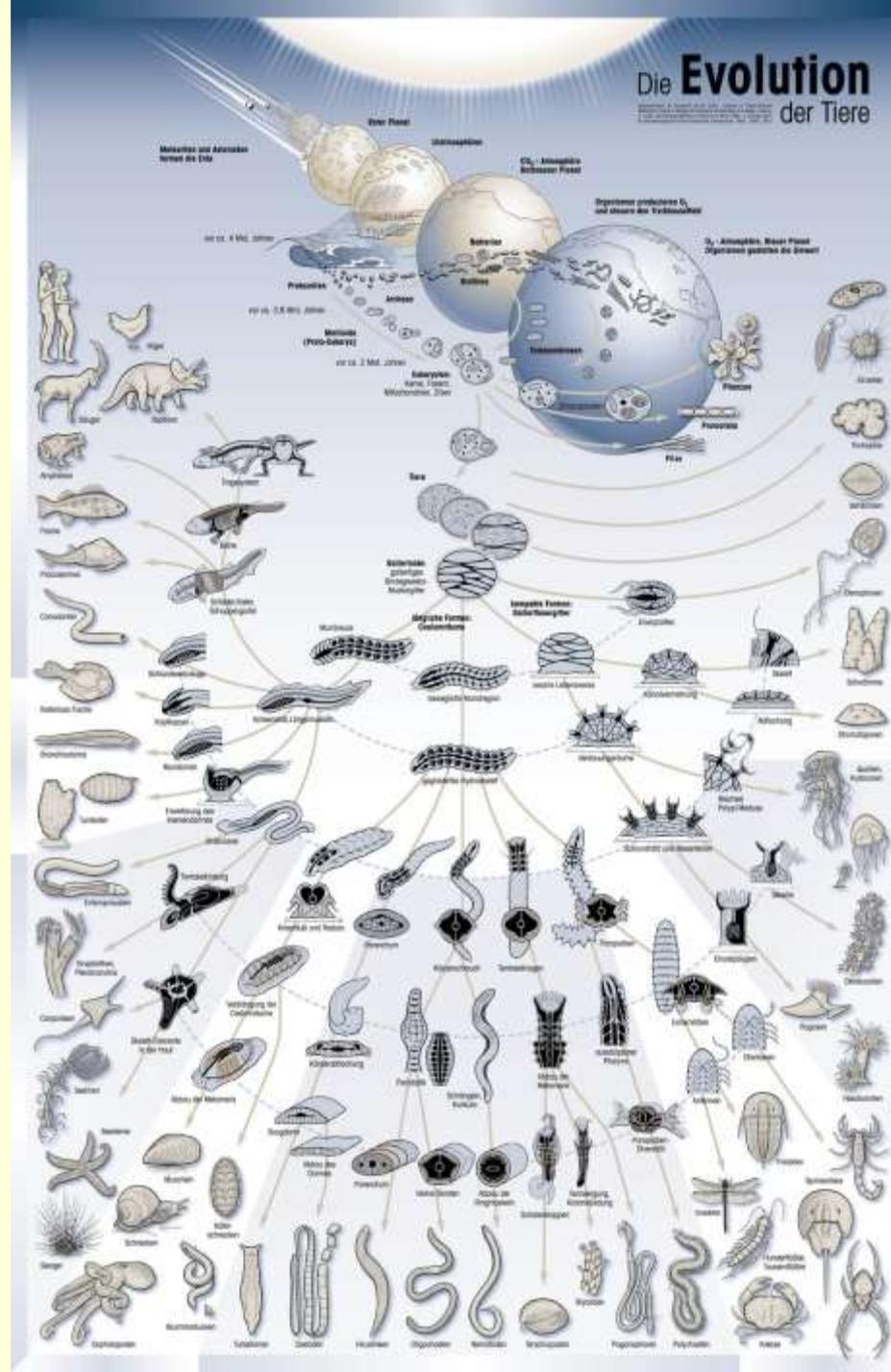
« Pas de sexualité, peu de diversité.  
 Peu de diversité, peu d'évolution  
 biologique. »

Peu d'évolution biologique,  
 peu de chance de produire  
 des cerveaux humains ! »



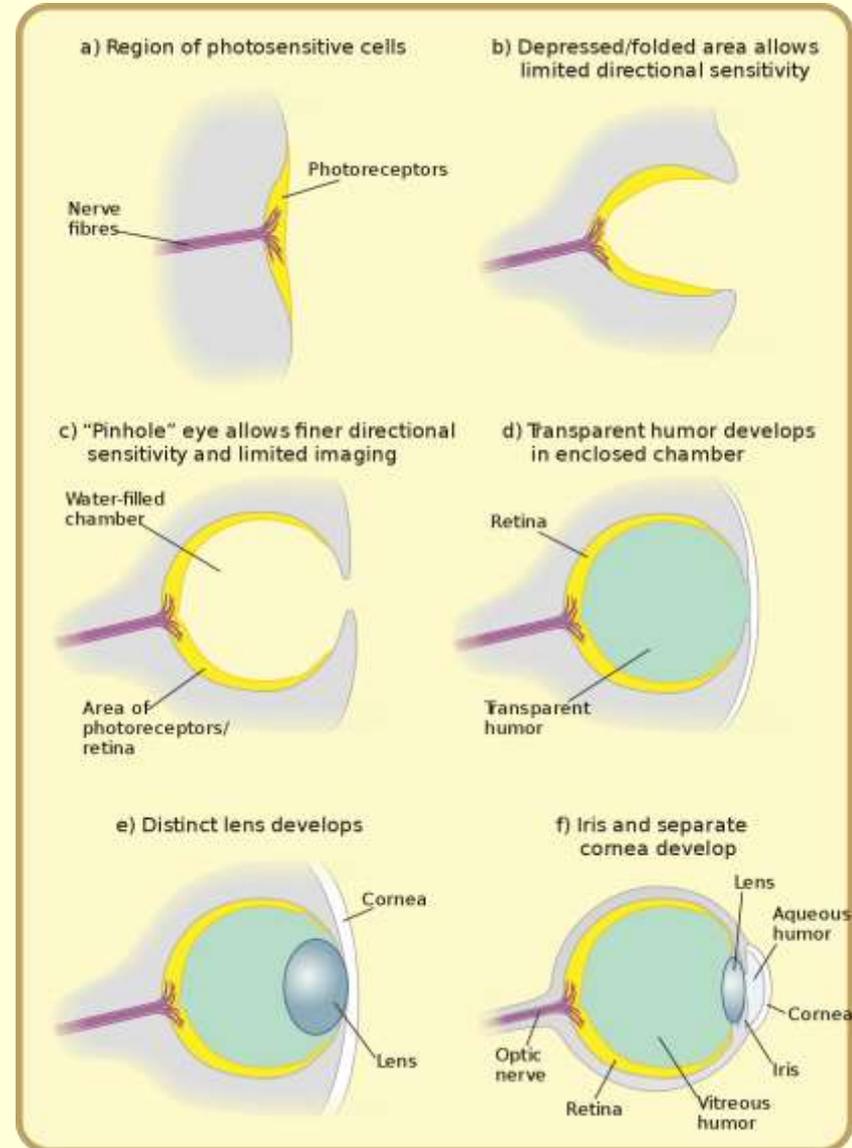
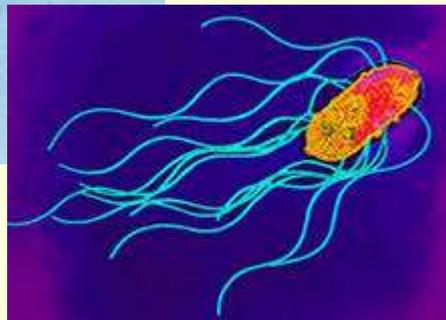
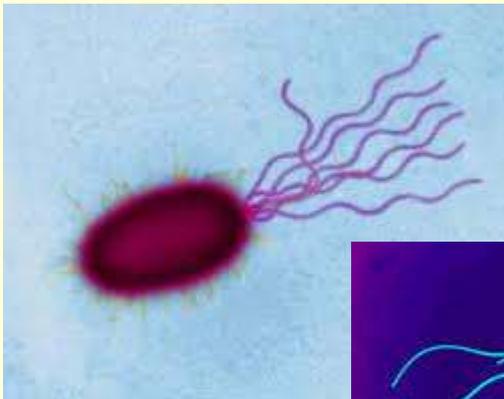
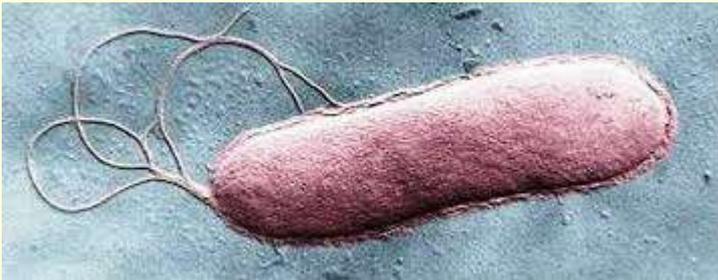
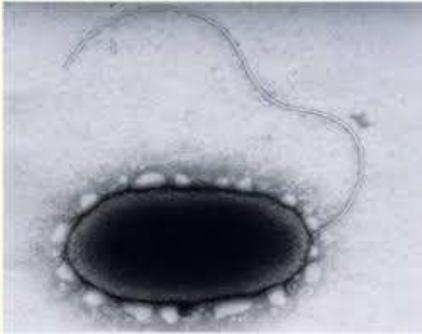
# Un moteur important de l'évolution : La sélection naturelle

- 1- Les individus d'une population **diffèrent suite à des mutations** qui surviennent au hasard;
- 2- Plusieurs de ces différences sont **héréditaires**;
- 3- Certains individus, dans un environnement donné, ont des caractéristiques qui les **avantagent** en terme de survie et de reproduction;
- 4- Ils vont donc transmettre **plus efficacement à leur descendants ces caractères héréditaires avantageux**, et progressivement toute la population les possédera.

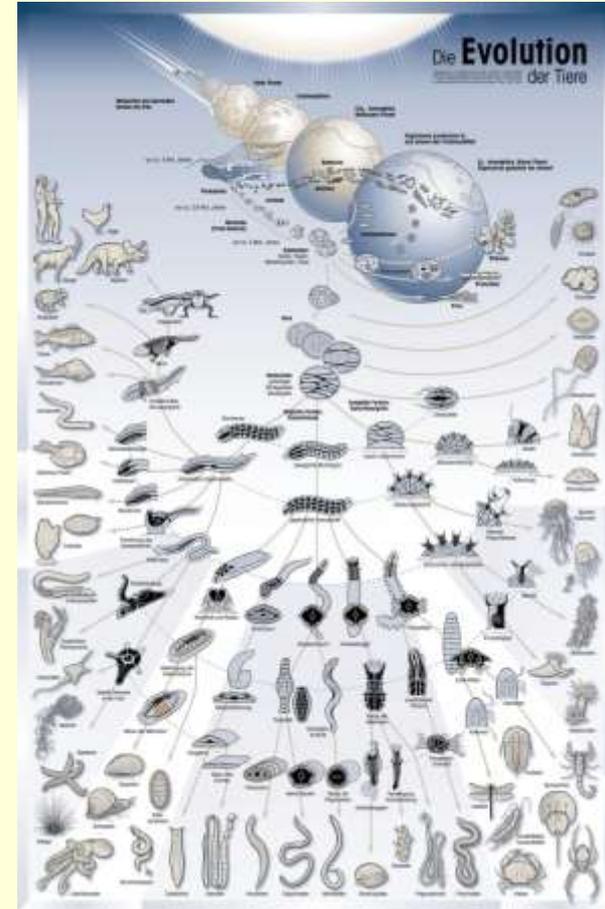
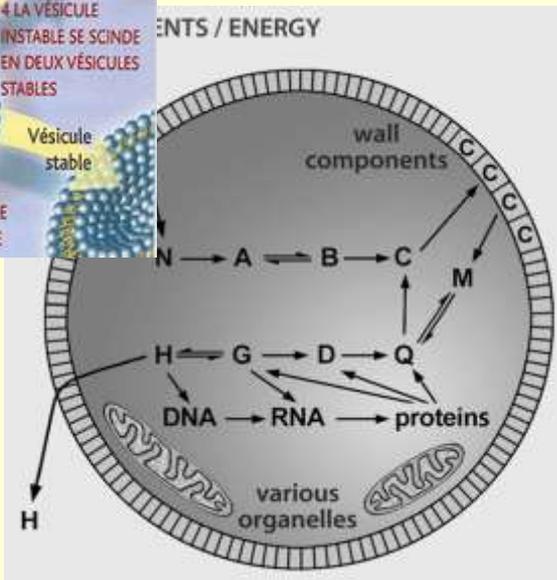
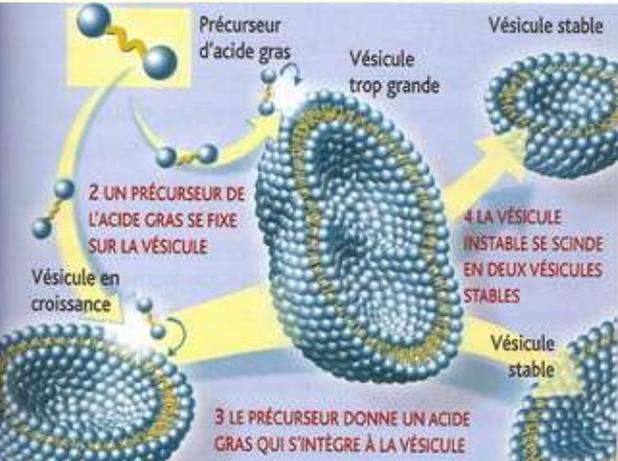
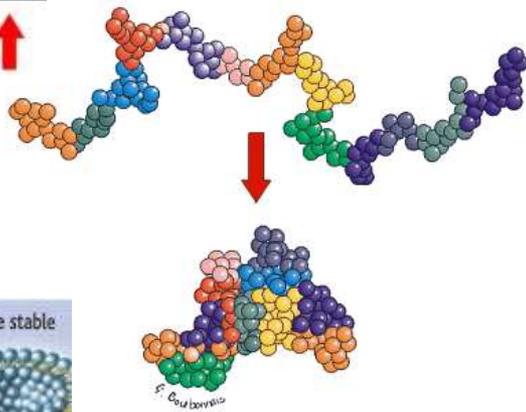
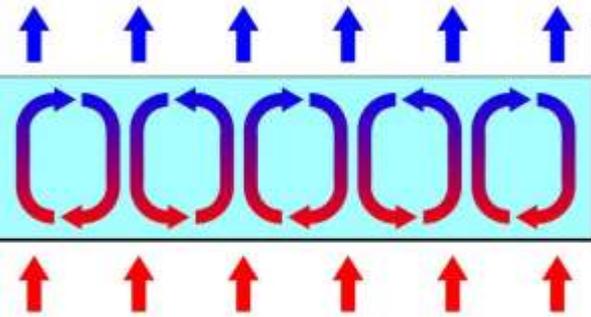


# Avec la sélection naturelle :

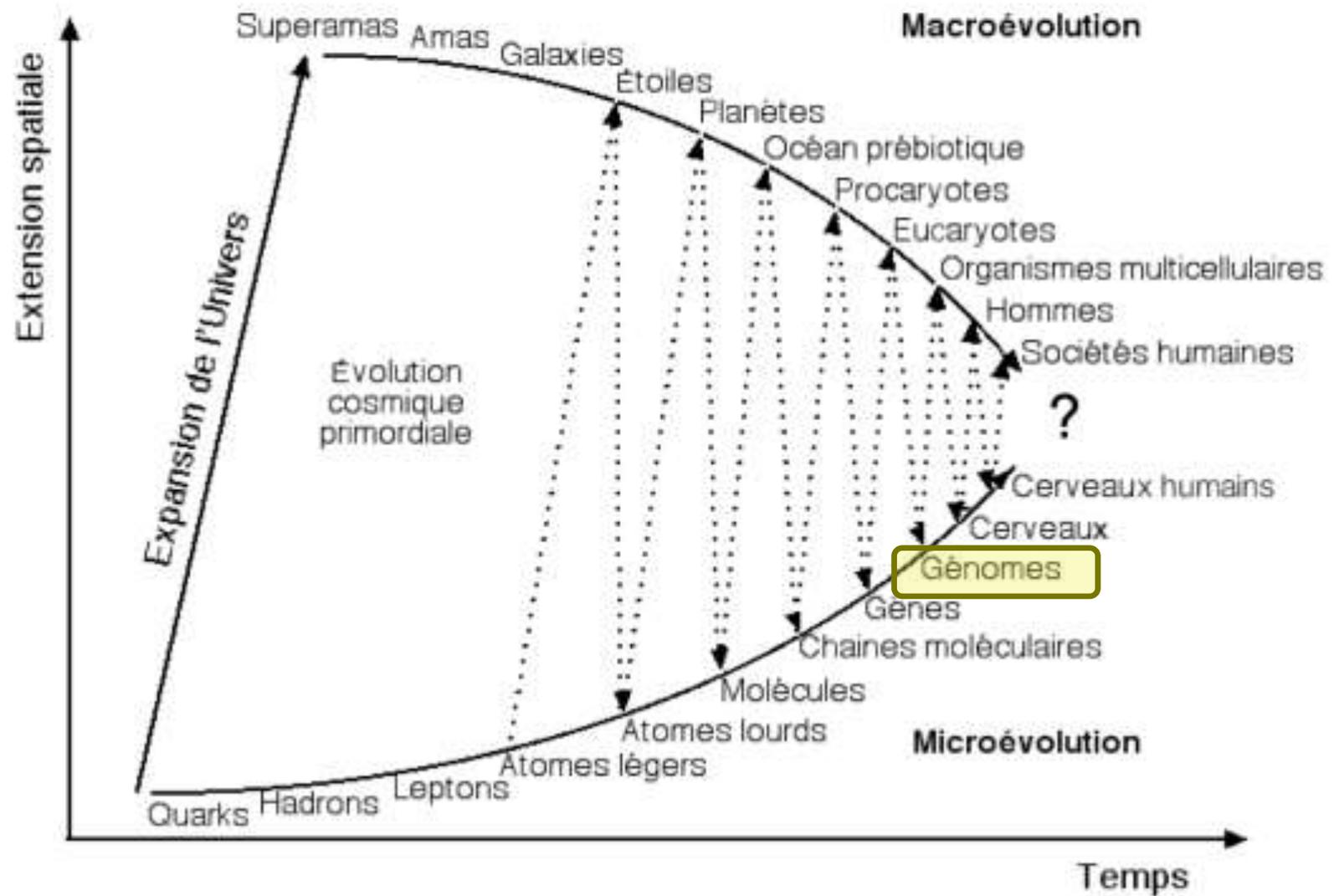
ce sont de petits changements **structuraux** qui créent éventuellement une **fonction** nouvelle (et non l'inverse)



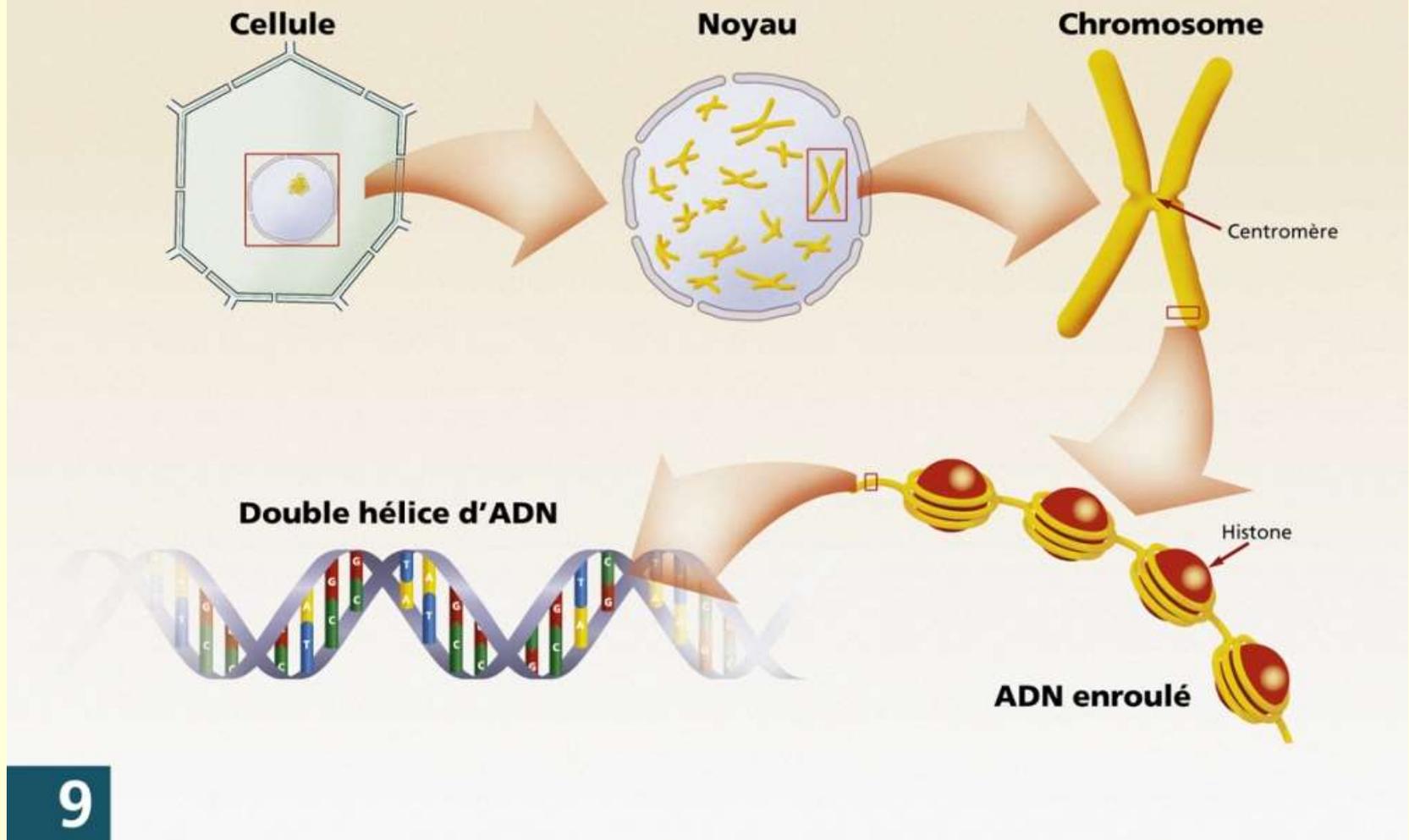
# Auto-organisation + Diversité & Sélection



= deux processus fondamentaux qui se renforcent mutuellement (théorie des systèmes évolutifs)



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



9

Chaque cellule eucaryote renferme un certain nombre de **chromosomes** qui est l'enroulement très serré du long brin d'**ADN** qui est le support physique des **gènes**.

Et c'est l'ensemble de ces chromosomes qu'on appelle le **génom**e.

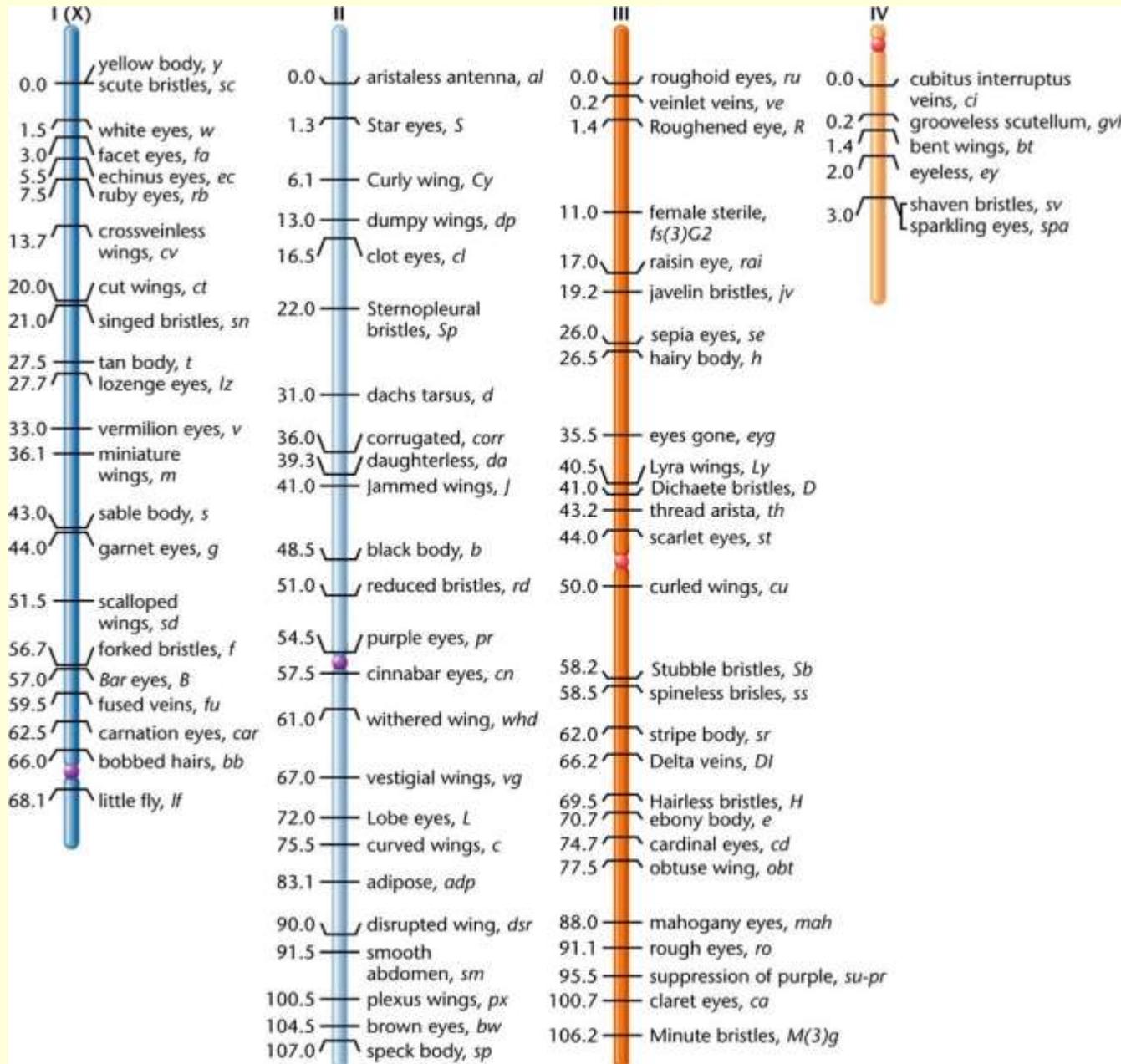
Mouche mutante



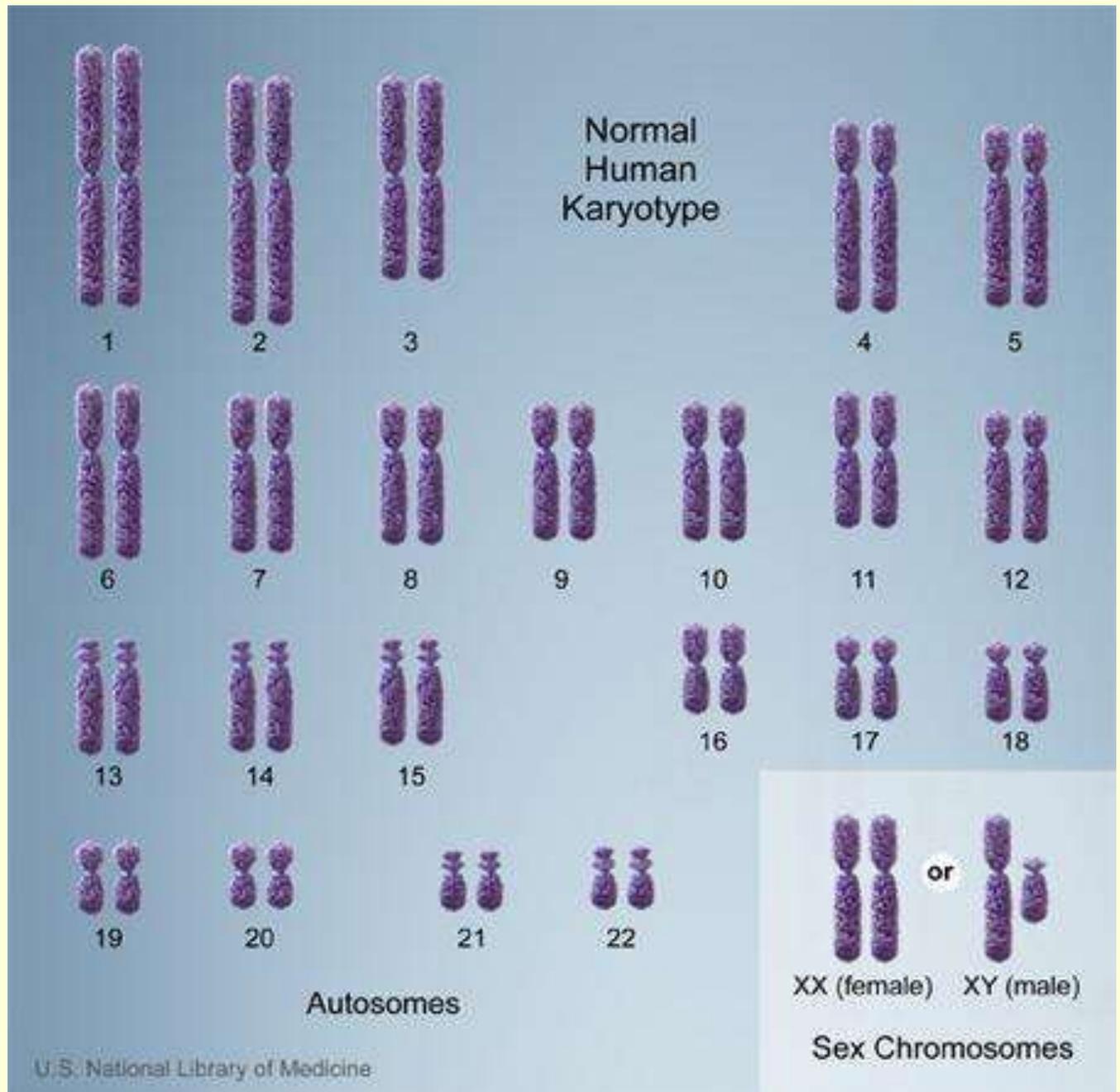
Mouche normale

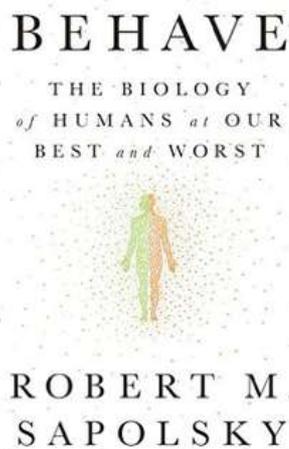


La mouche drosophile a un génome constitué de **13 000 gènes** portés sur **4 paires de chromosomes**



L'être humain, lui, a un génome constitué d'environ **20 000 gènes** portés sur **23 paires de chromosomes**.





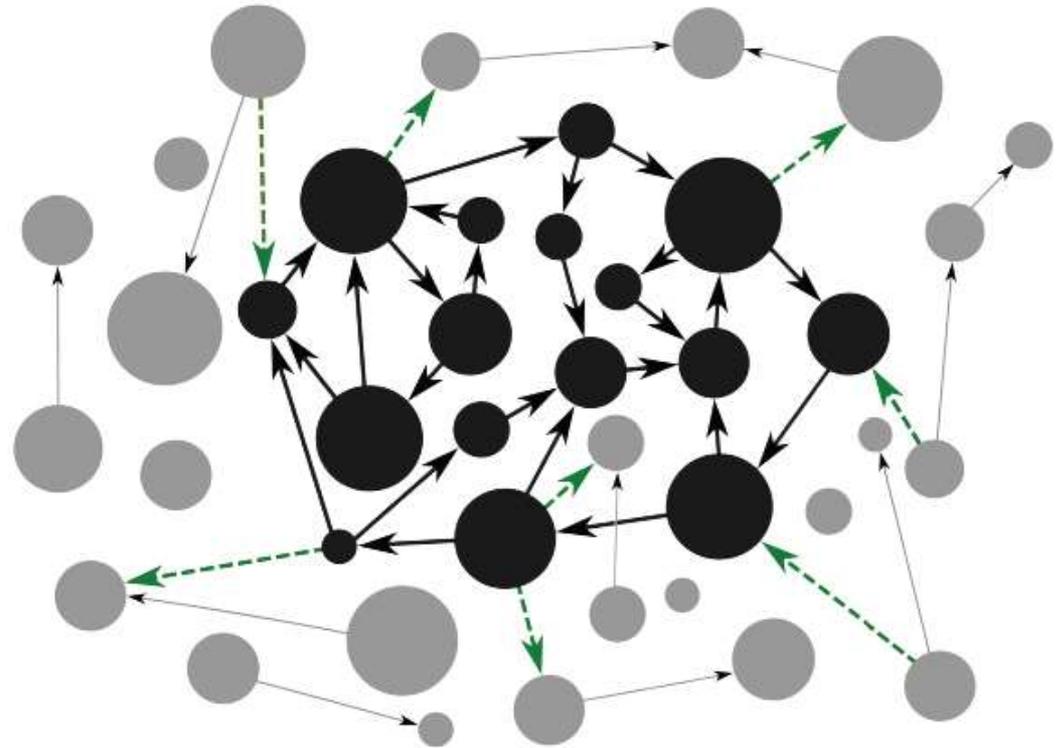
Genes have plenty to do with behavior. Even more appropriately, all behavioral traits are affected to some degree by genetic variability.<sup>65</sup> They have to be, given that they specify the structure of all the proteins pertinent to every neurotransmitter, hormone, receptor, etc. that there is. And they have plenty to do with individual differences in behavior, given the large percentage of genes that are polymorphic, coming in different flavors. But their effects are supremely context dependent. Ask not what a gene does. Ask what it does in a particular environment and when expressed in a particular network of other genes (i.e., gene/gene/gene/gene . . . /environment).

En noir :

Le réseau de gènes

que forme notre **génom**

où l'expression de chaque gène est régulé par de nombreux facteurs environnementaux (en gris).

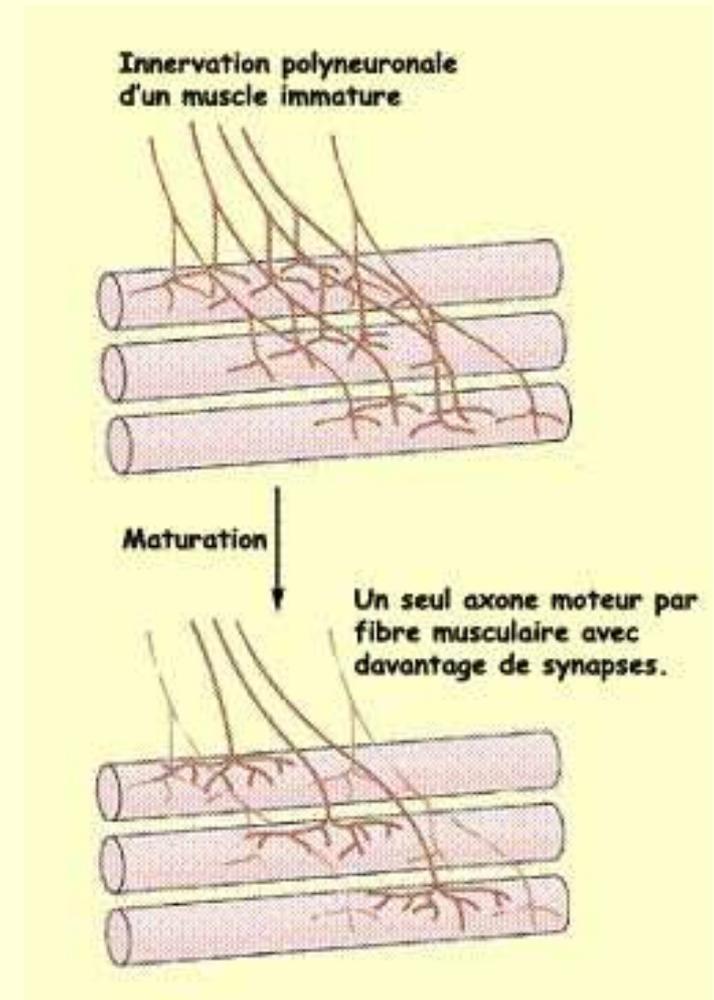


Et en ce qui concerne le cerveau plus particulièrement, 20 000 gènes pour spécifier l'emplacement de 85 milliards de neurones et de leur 1000 ou 10 000 connexions chacun, c'est pas assez !

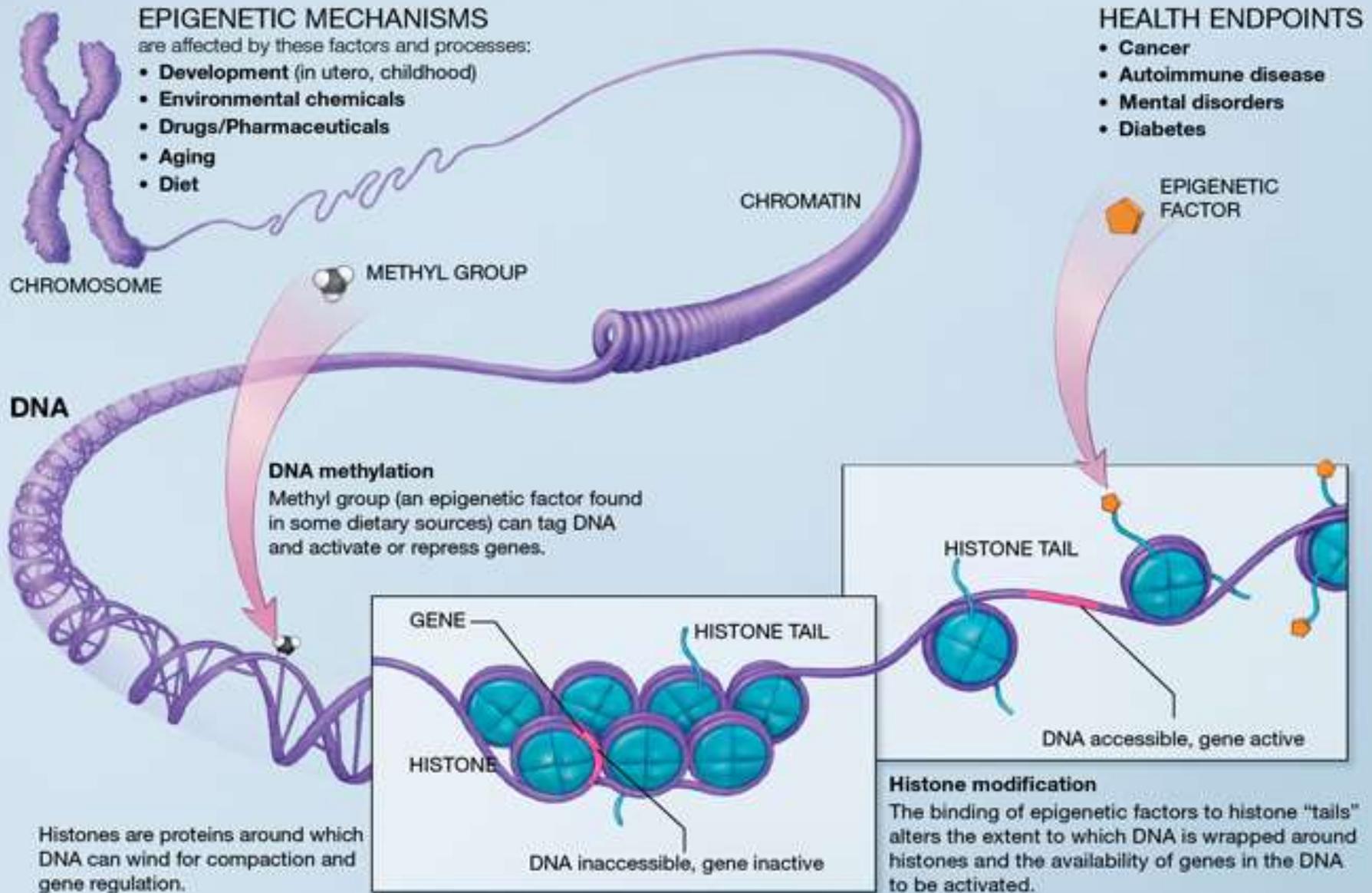
Il va donc devoir y avoir des choses qui se passent « après les gènes », durant le développement.

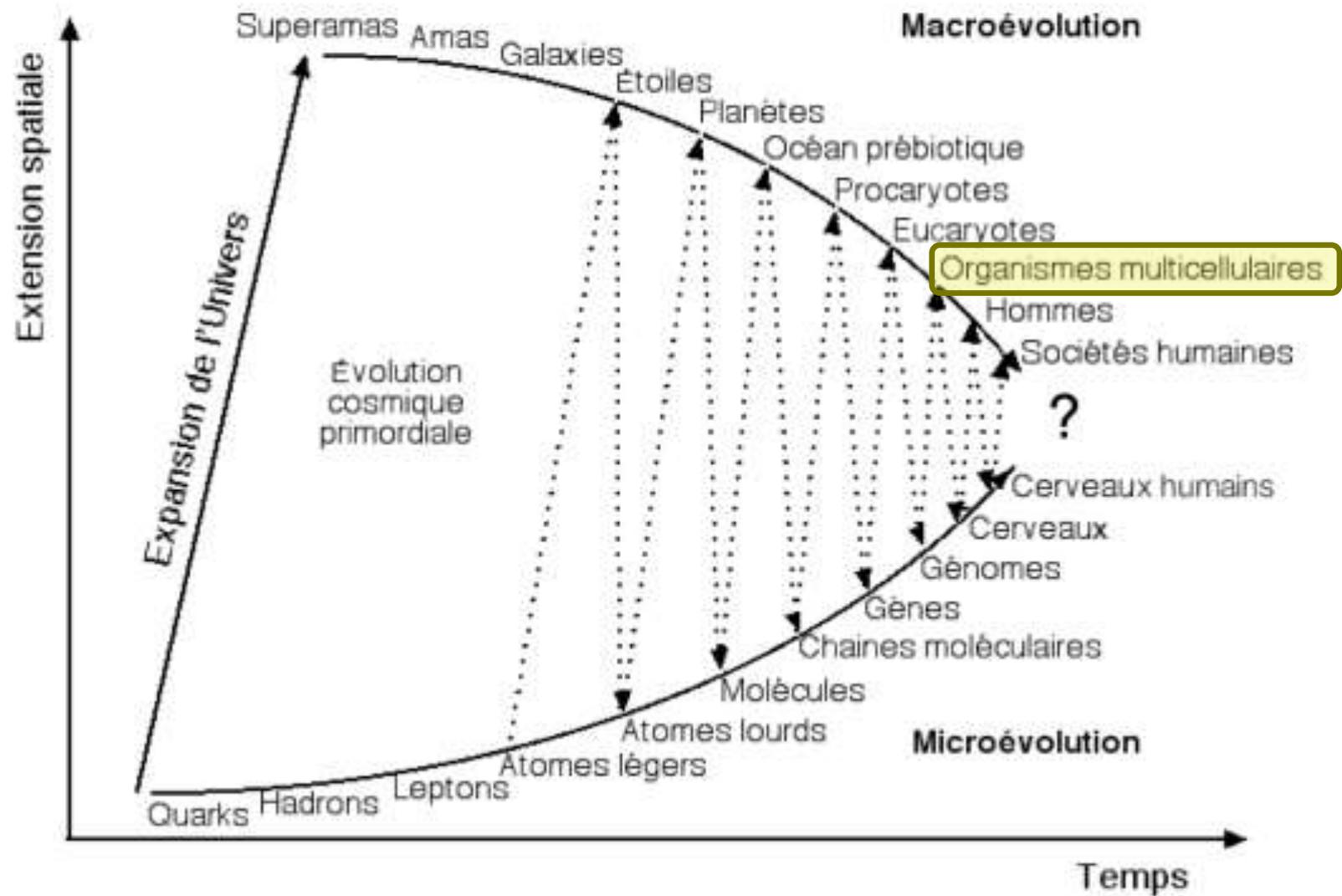
Ces phénomènes **épigénétiques** », qui surviennent donc après la naissance, étaient déjà observés vers 1972 par J-P Changeux et son équipe (rapportés dans l'*Homme neuronal*, 1983).

Ils sont sous le contrôle de l'activité du réseau et se font sur le mode "darwinien" de **compétition** et **d'élimination** de synapses.

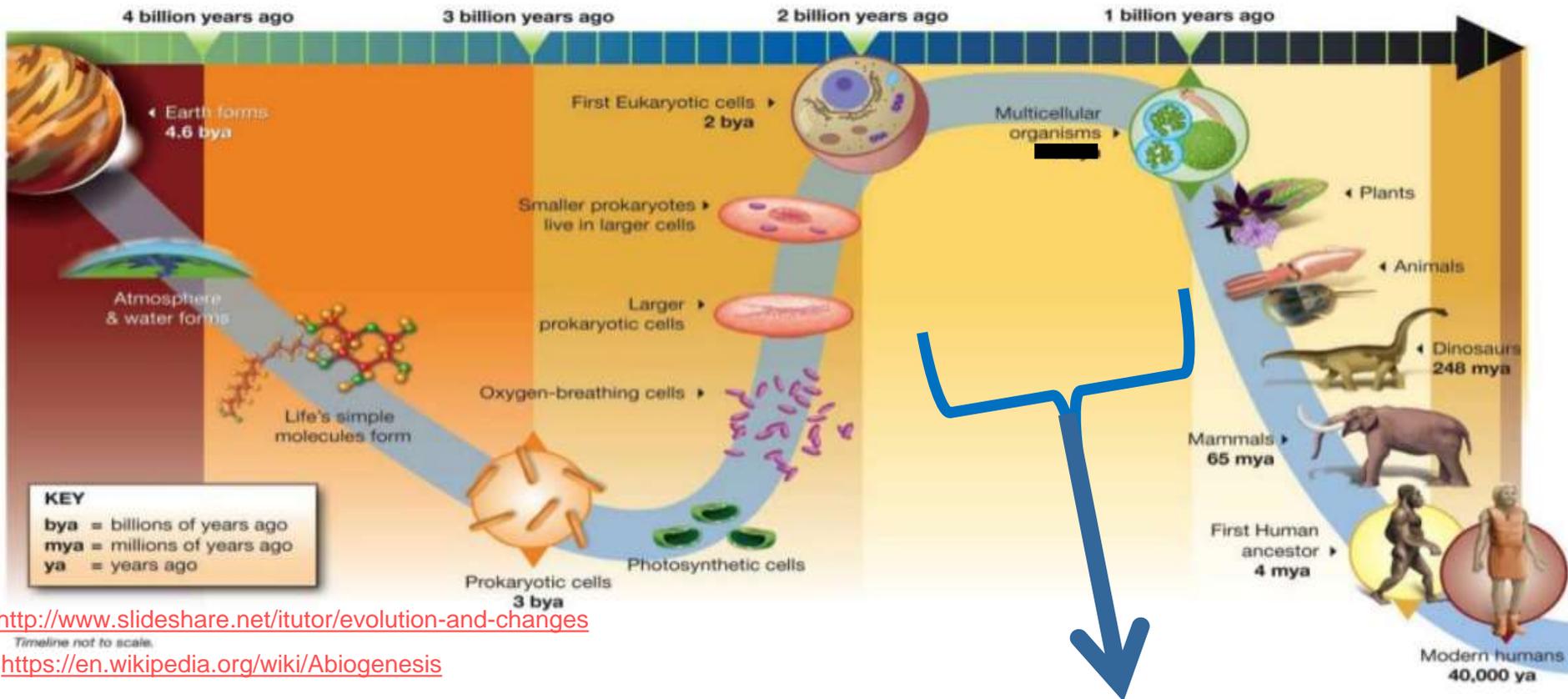


Le spectre des phénomènes **épigénétiques** s'est beaucoup élargi et on connaît maintenant certains mécanismes moléculaires qui **contrôlent l'expression des gènes**.





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

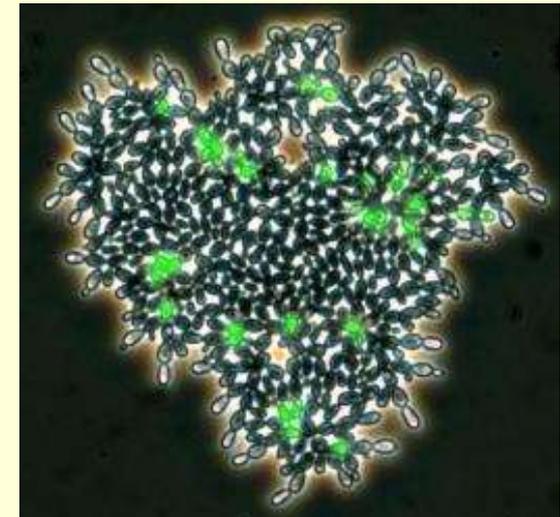


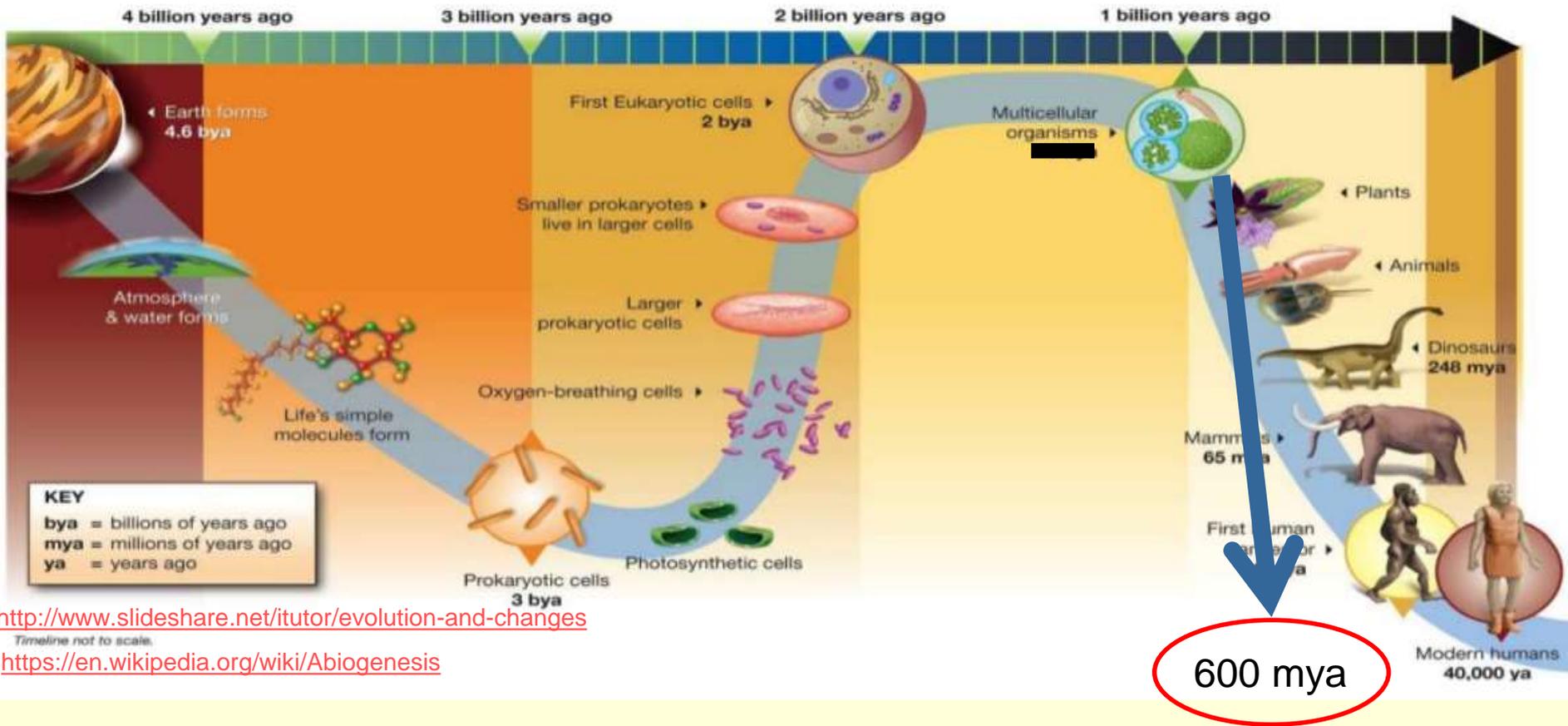
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

À partir d'il y a environ 2 milliards d'années, on estime que la **multicellularité** est apparue au moins 25 fois au cours de l'évolution, par des mécanismes différents,

probablement en raison des avantages sélectifs qu'elle confère (augmentation de la taille de l'organisme, **spécialisation cellulaire**, etc.)





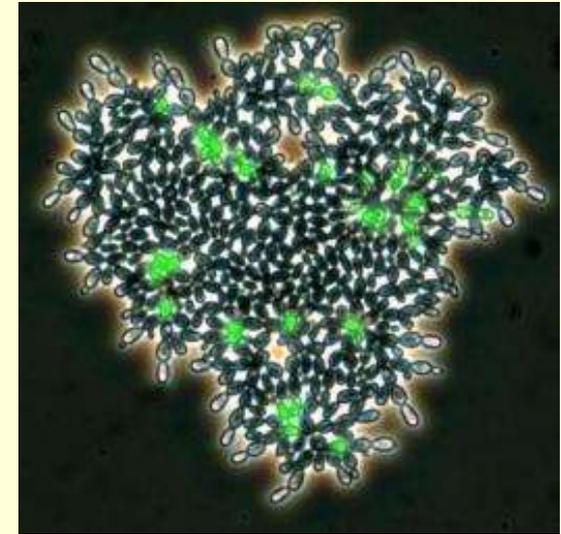
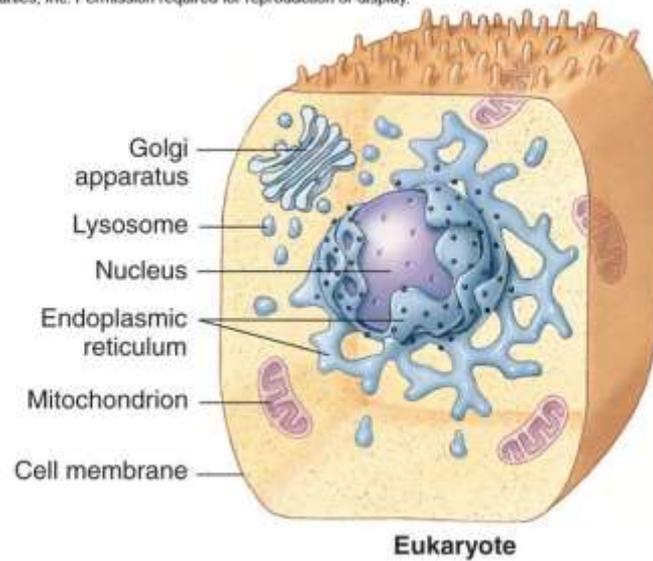
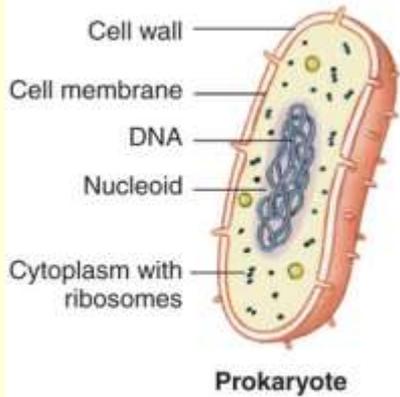
L'émergence de la vie **multicellulaire** apparaît véritablement il y a un peu plus de **600 millions d'années**

(les animaux multicellulaires les plus simples d'aujourd'hui (les éponges) seraient apparus au plus tard il y a **635 millions d'années**).



# Qu'apporte le passage des unicellulaires aux pluricellulaires ?

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



# Accélération du 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

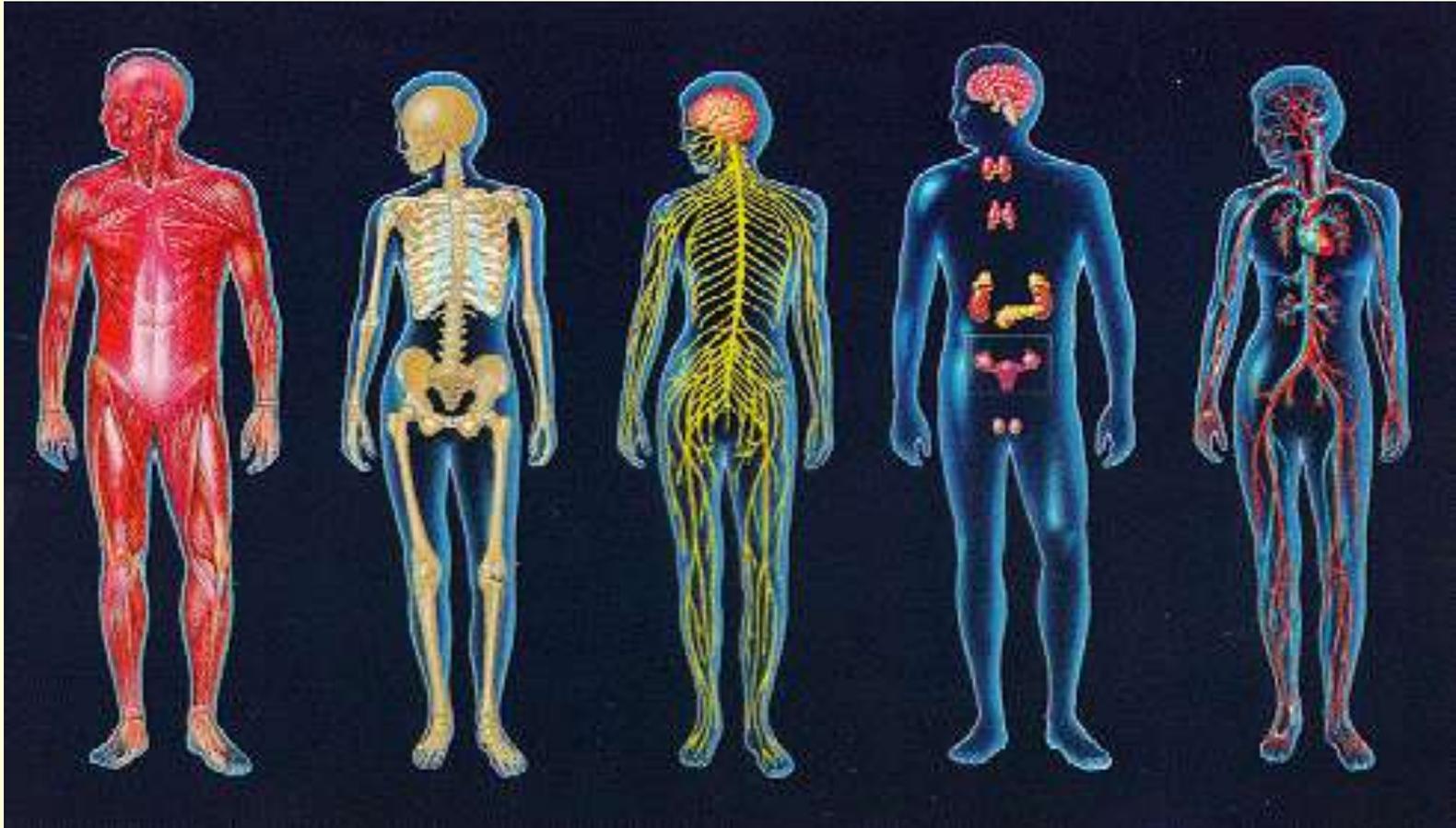
Ces cellules spécialisées vont former différents **tissus** et **organes**,  
et finalement différents **grands systèmes...**

Musculo-squelettique

Nerveux

Endocrinien

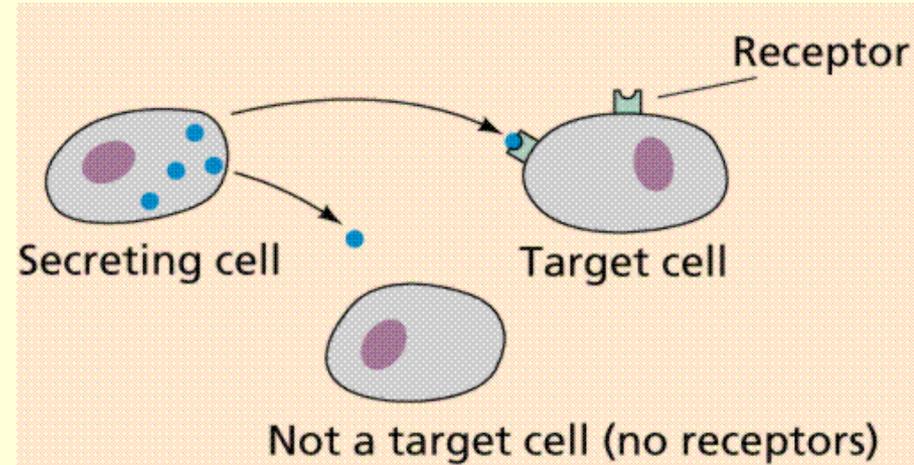
Circulatoire



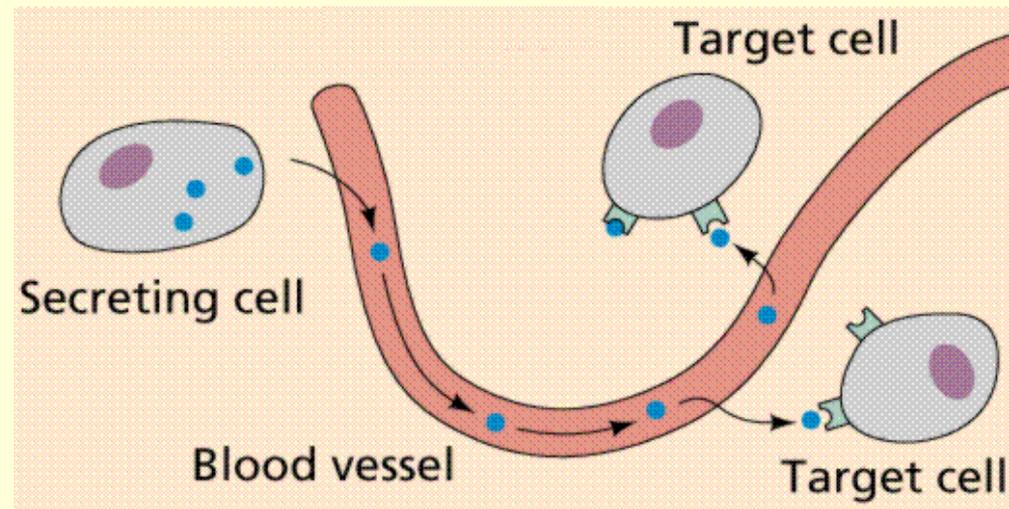
Mais leur origine...

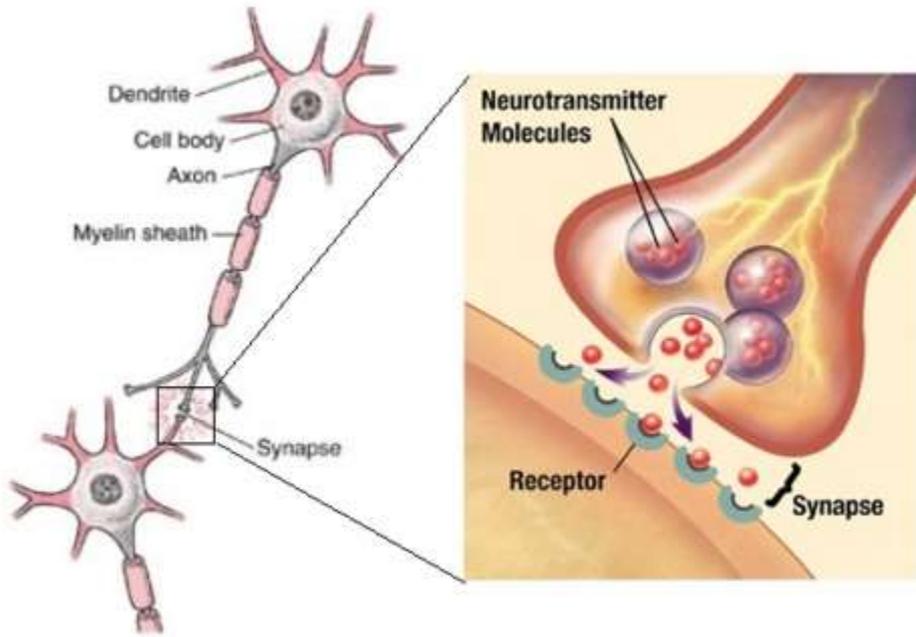


...est très ancienne et moins « tranchée » !

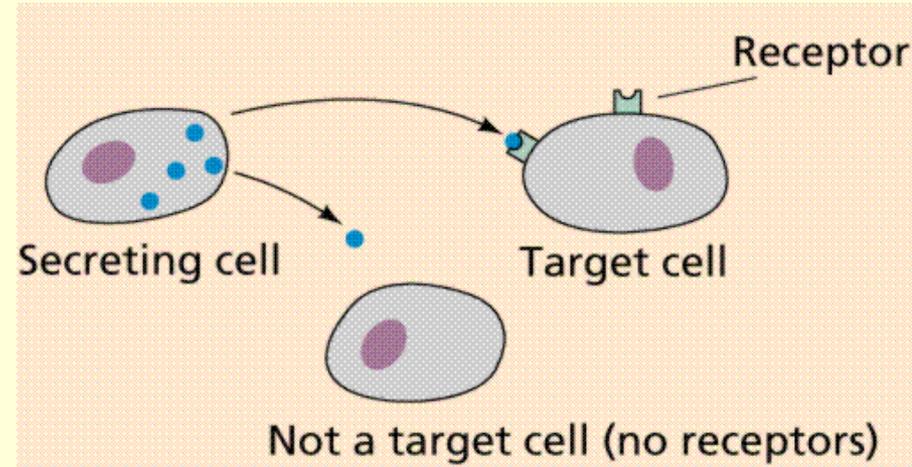


**Hormones !**  
(système endocrinien)

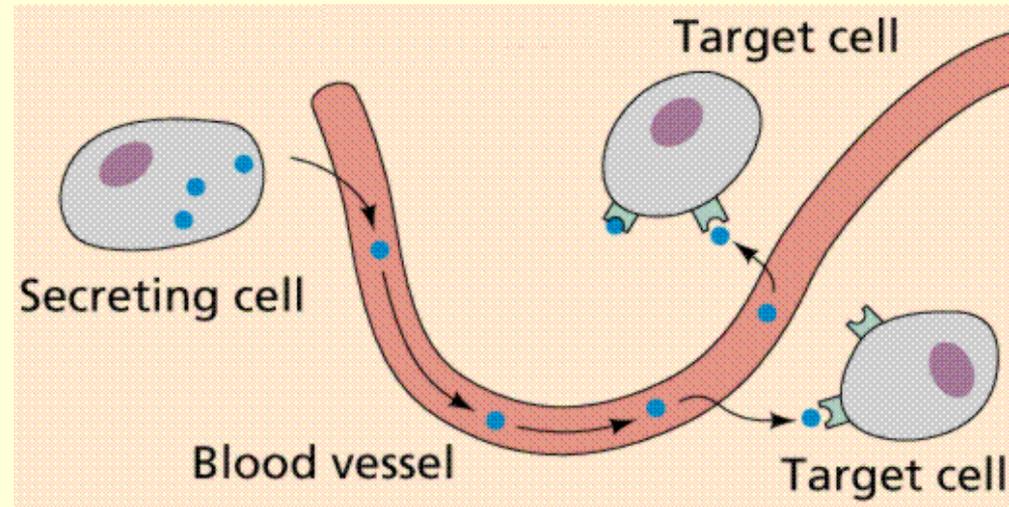




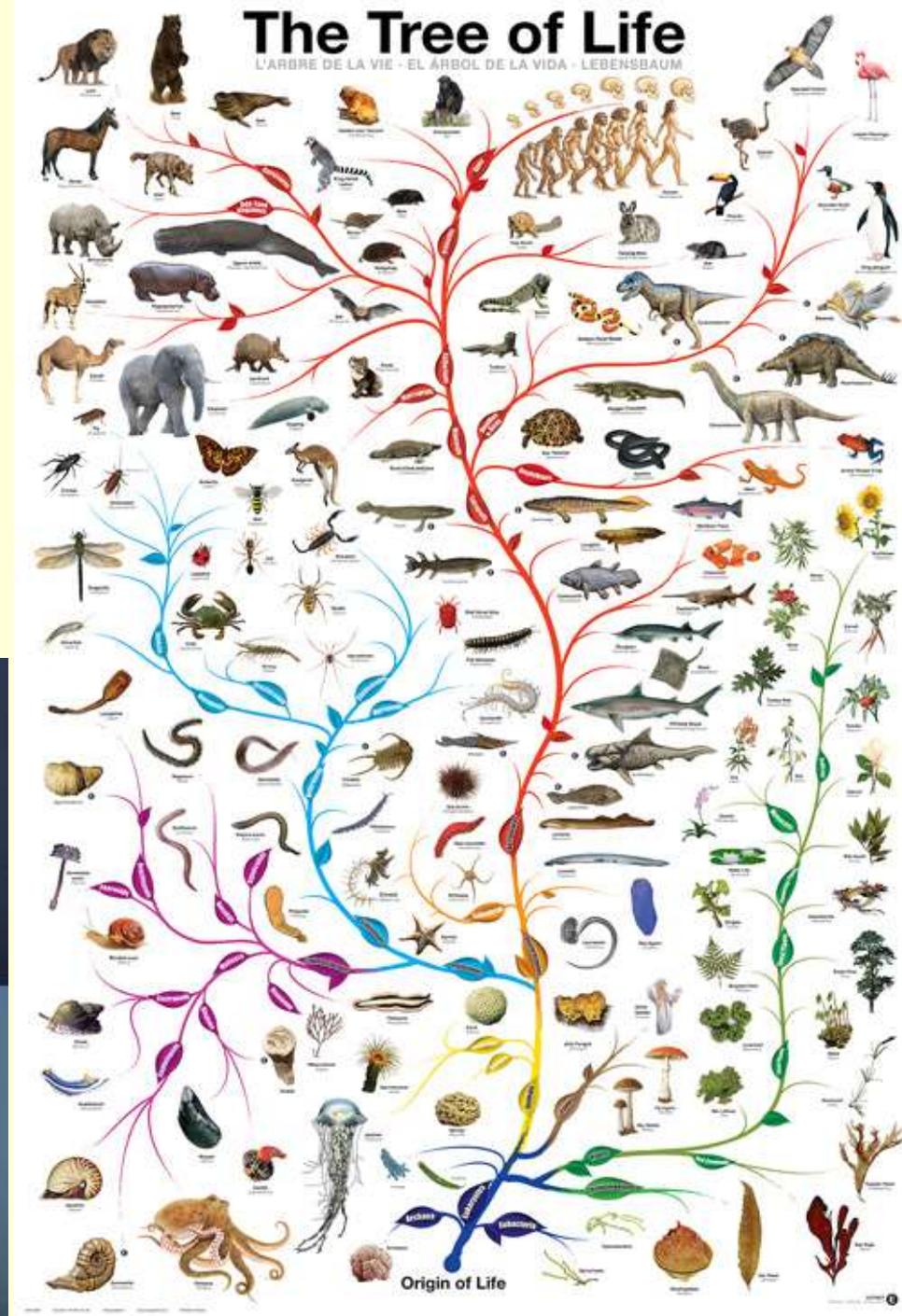
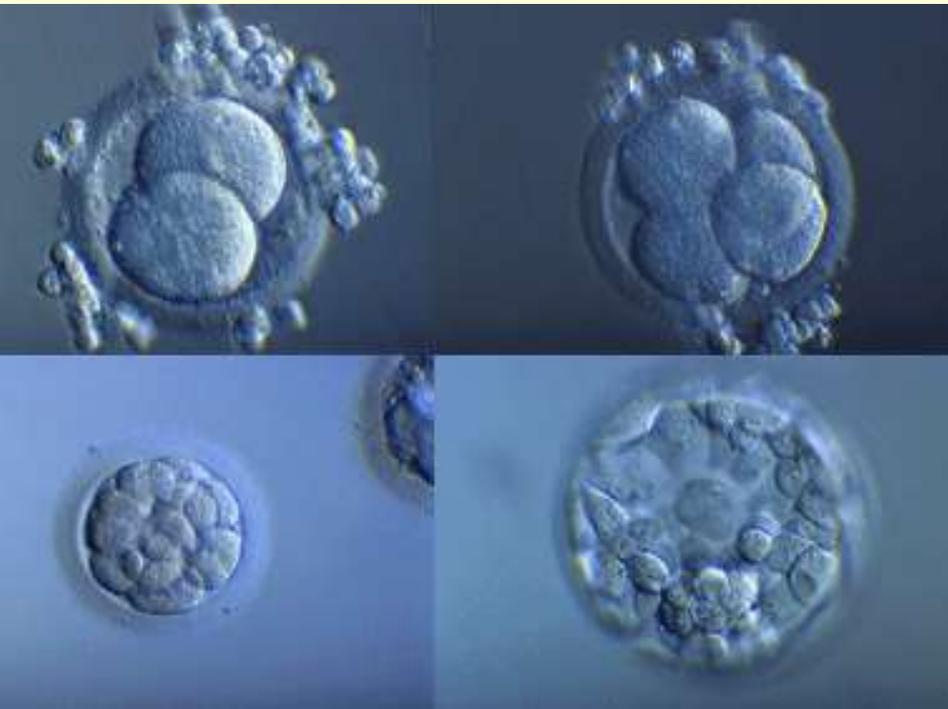
...mais aussi neurotransmetteurs et récepteur des neurones du **système nerveux !**

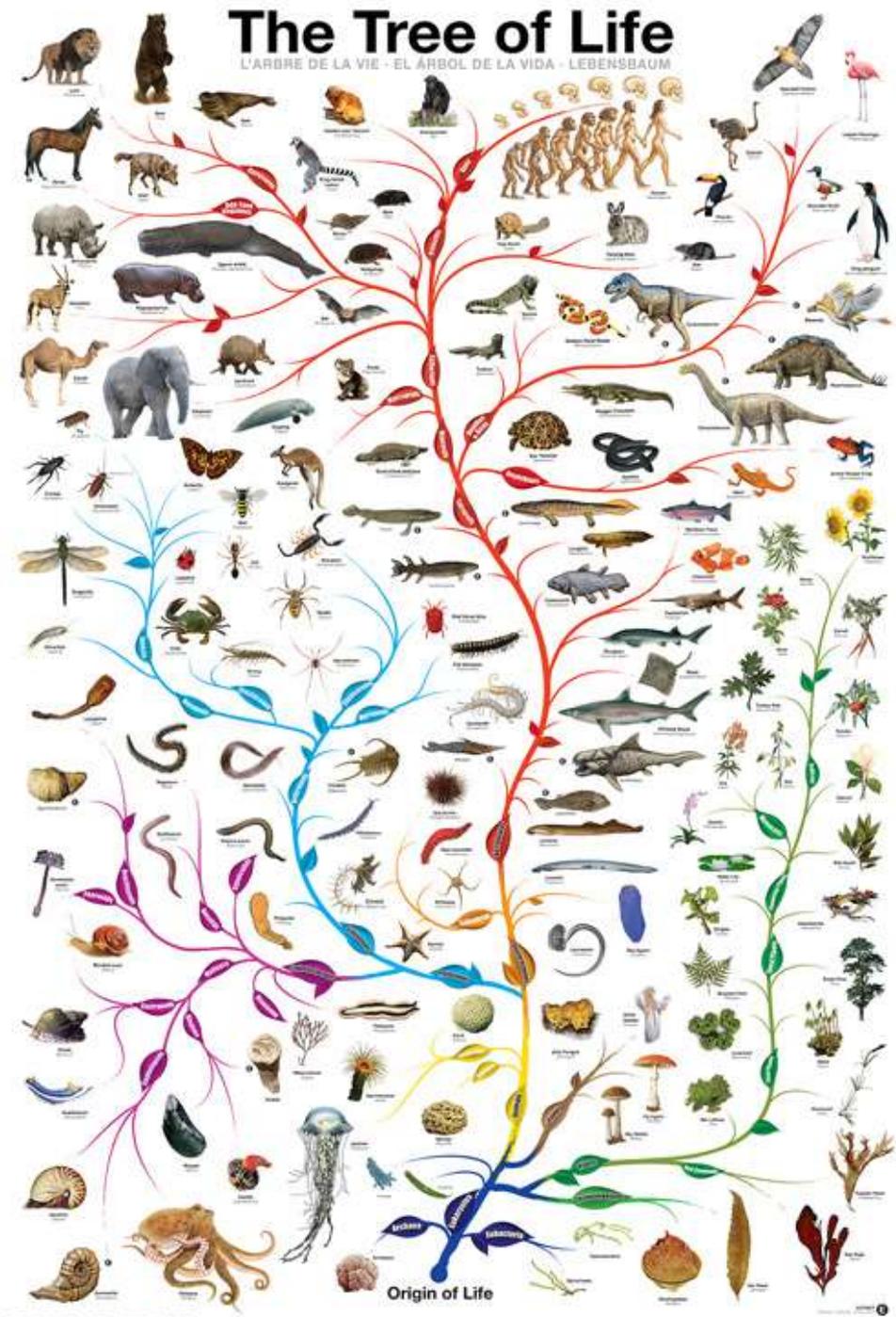
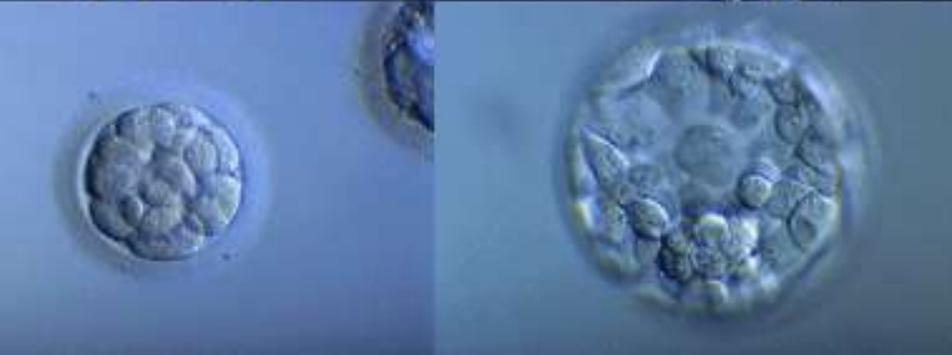
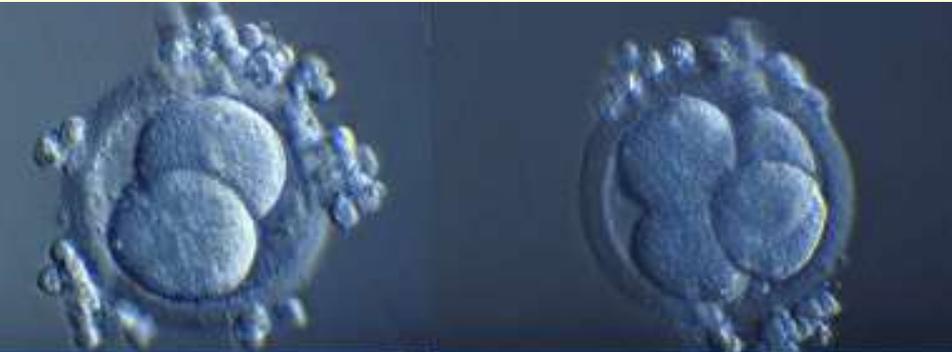
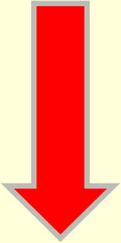
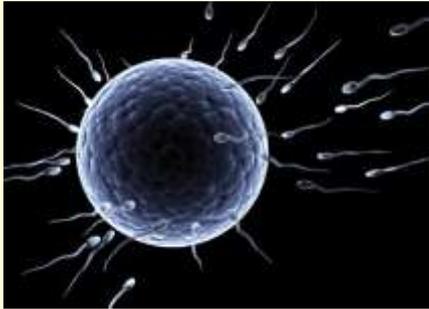


**Hormones !**  
(système endocrinien)



Il ne faut pas oublier non plus que le **stade unicellulaire** est toujours présent dans le cycle de vie des multicellulaires !

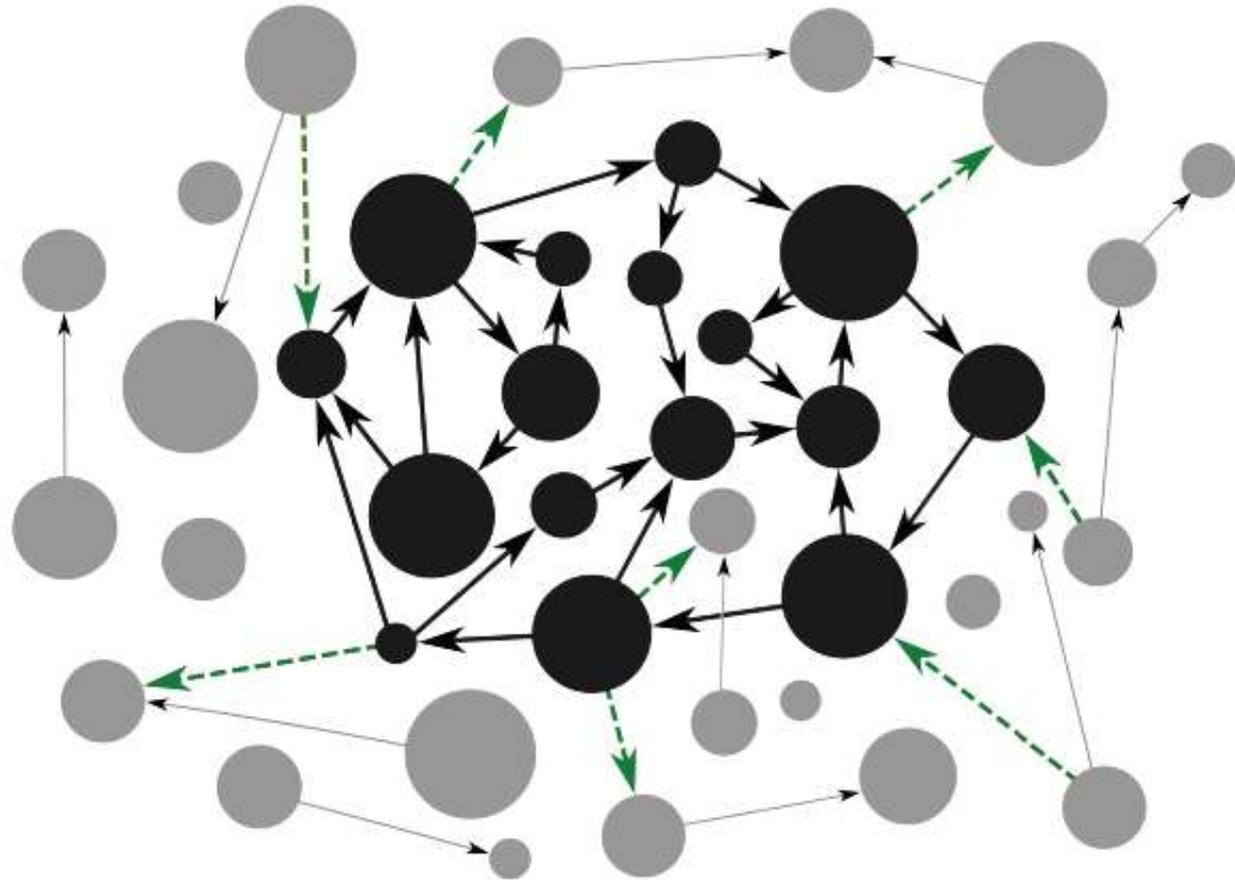




**En noir** : un organisme

dont les différentes  
cellules spécialisées  
interagissent  
préférentiellement  
entre elles

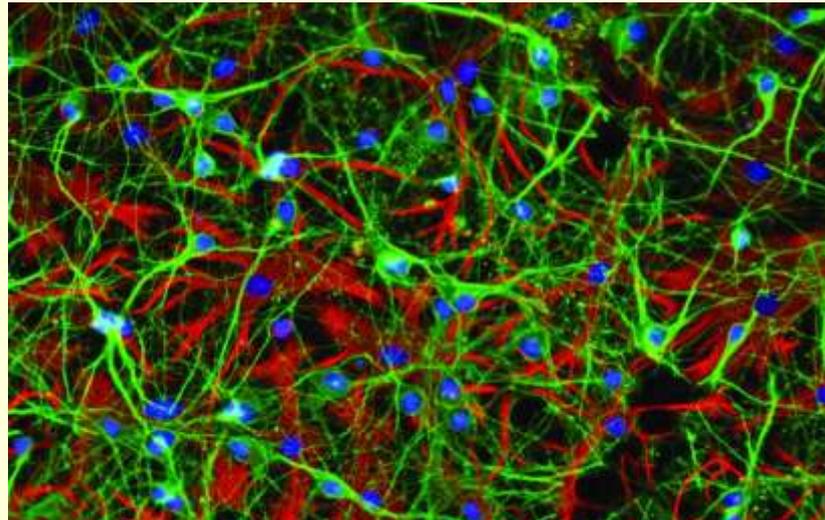
(mais c'est toujours  
un « système ouvert »  
du point de vue  
thermodynamique)

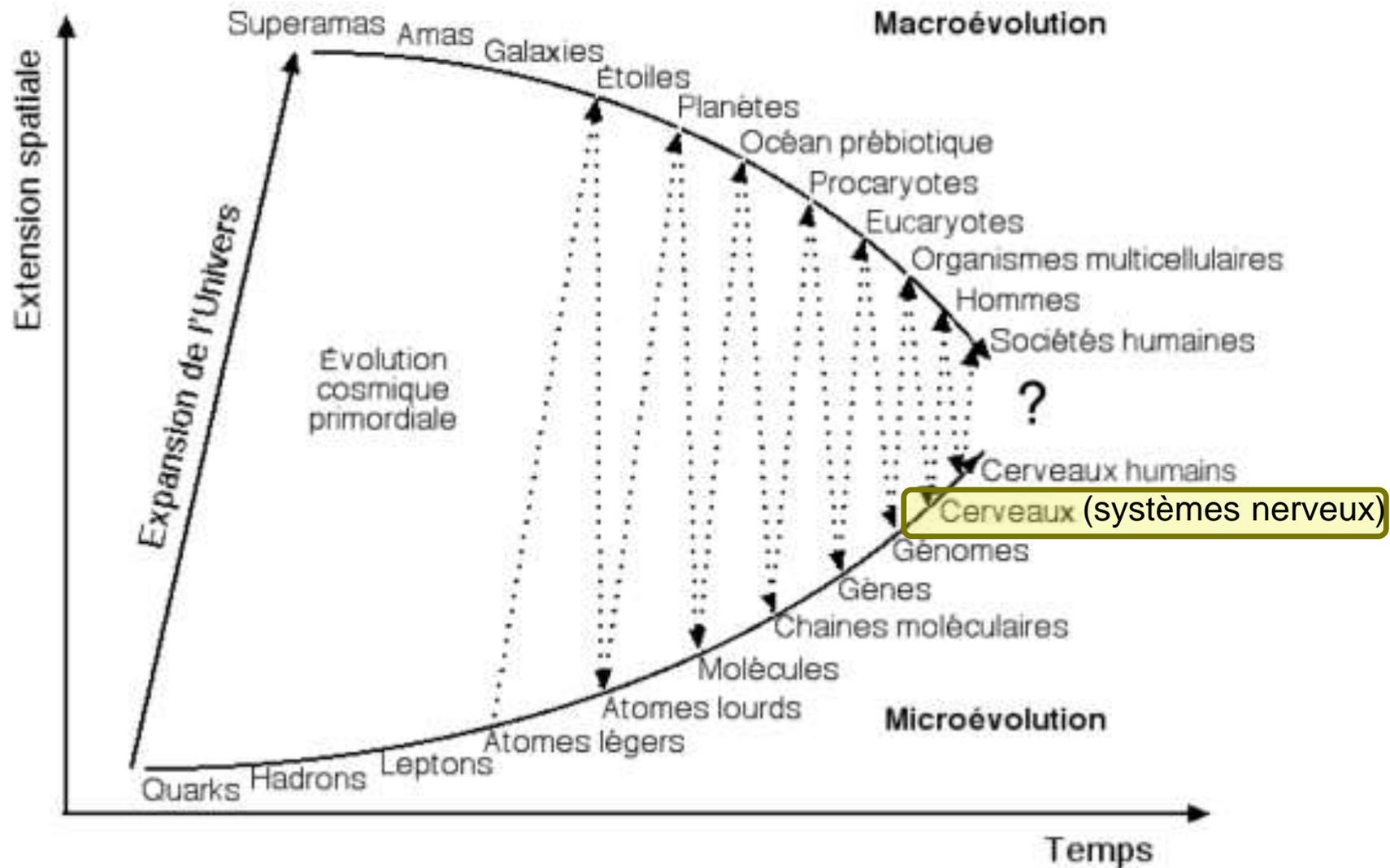


Copyright Ezequiel Di Paolo, 2013. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en\\_US](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en_US)

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

Car encore aujourd'hui,  
toute la puissance computationnelle de  
notre cerveau vient du travail coordonné  
de ses milliards de cellules.





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

2<sup>e</sup> principe de la thermodynamique :

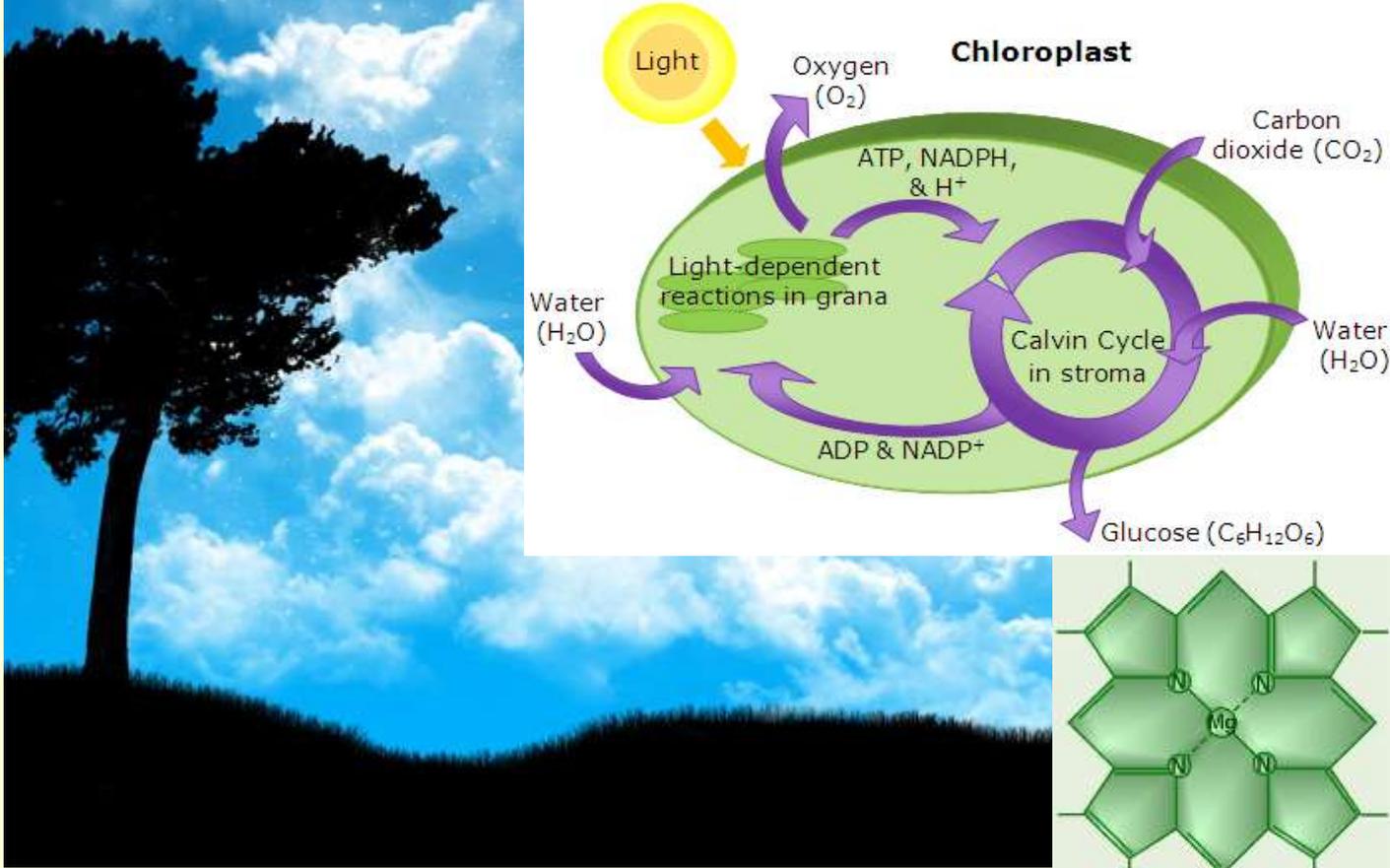
l'entropie (désordre) croît constamment





« 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





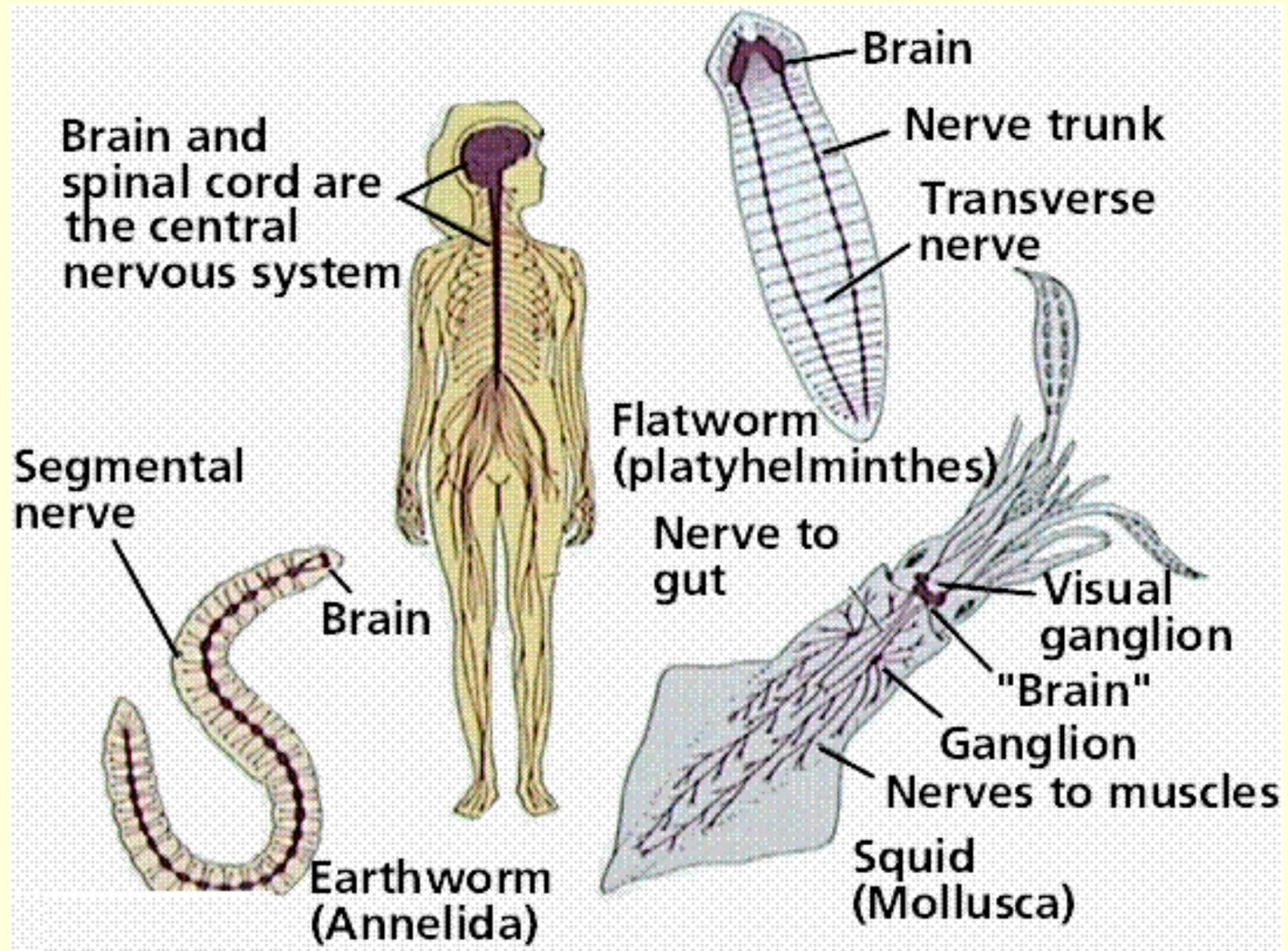
## Animaux :

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

Qu'est-ce qui se développera chez les **hétérotrophes (animaux)** que les **autotrophes (plantes)** n'ont pas besoin ?



# Un système nerveux !



# Un système nerveux !

Différent du **système hormonal** : le moment des premières règles d'une femme varie, l'important c'est qu'elle finisse par les avoirs...

Différent du **système immunitaire** : commencez à fabriquer des anticorps ce soir au lieu de maintenant et ce sera rarement fatal...

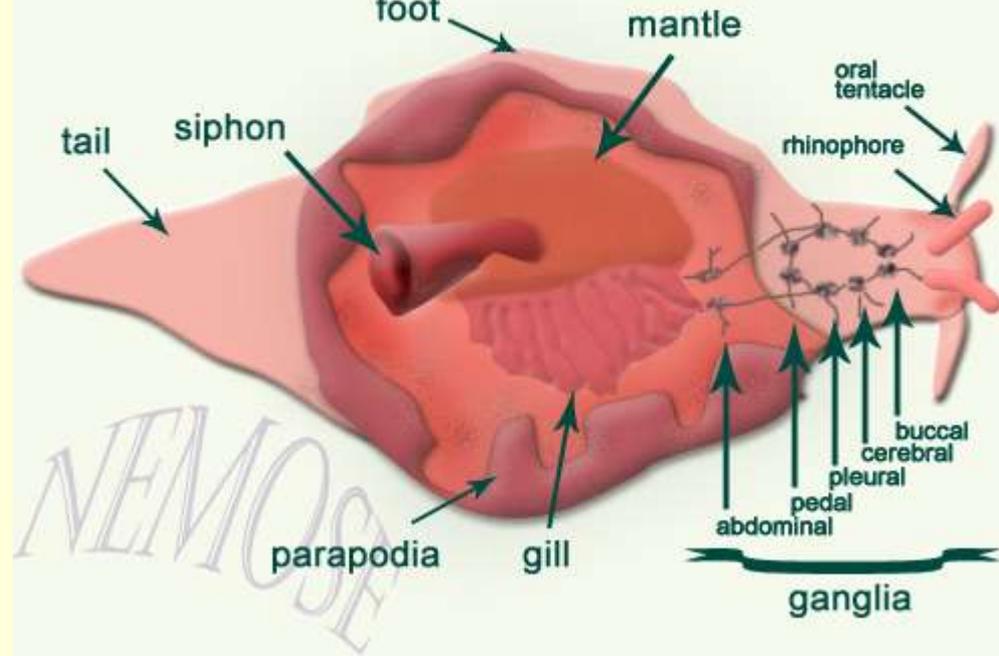
Mais ne bondissez pas en une fraction de seconde après avoir aperçu un guépard surgir des hautes herbes, et ne produisez pas une accélération fulgurante en évitant les obstacles devant vous et votre existence peut se terminer là.

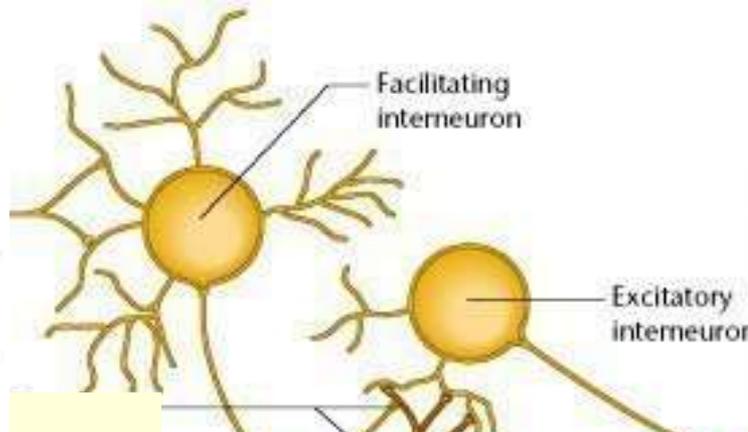
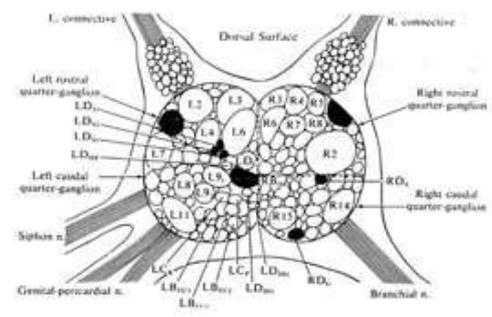
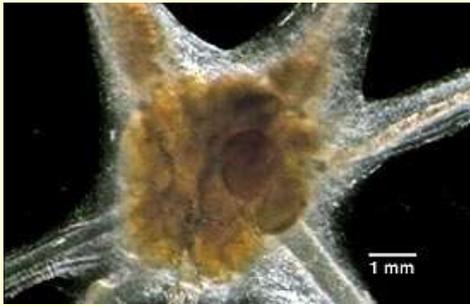
Faire ressortir du sens du chaos du monde et y réagir promptement, voilà le rôle du **système nerveux**.





**Aplysie**  
(mollusque marin)





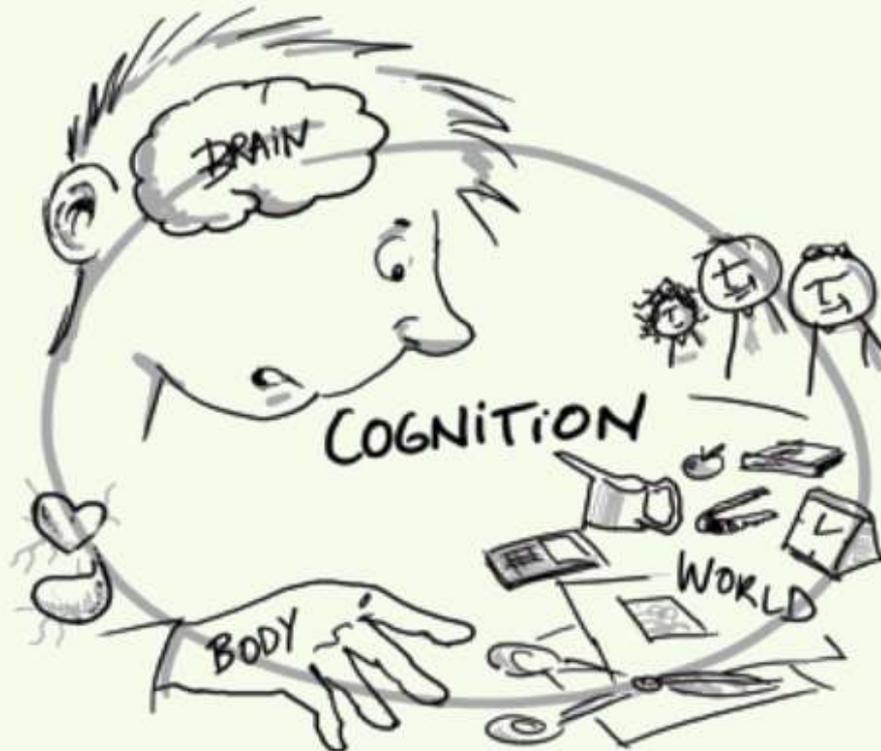
# Une boucle sensori - motrice

qui va permettre de **connaître** le monde et **d'agir** sur ce monde.

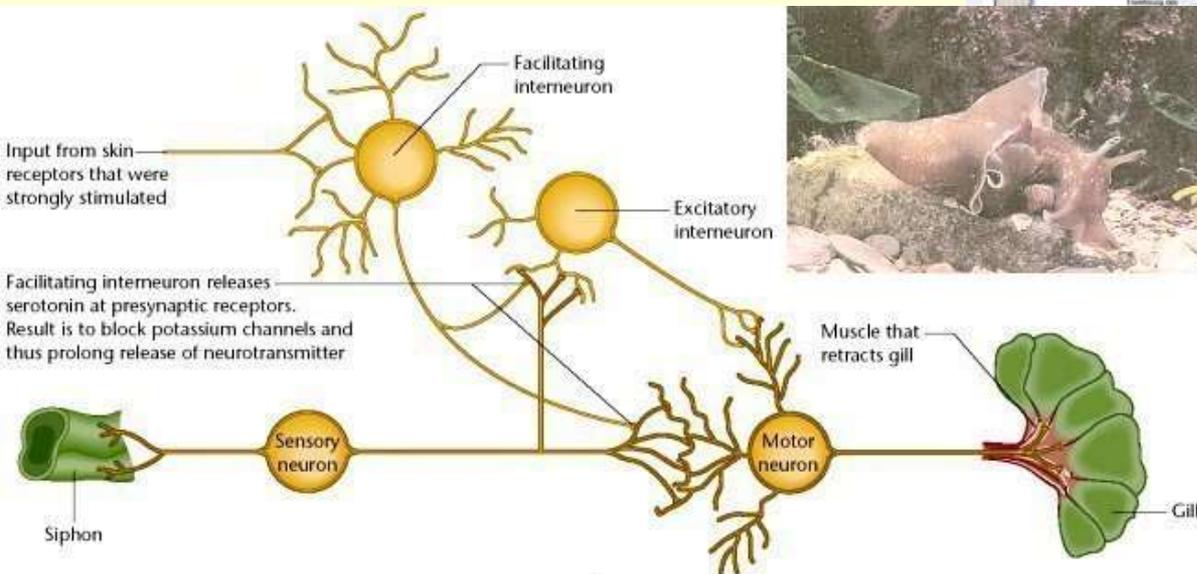
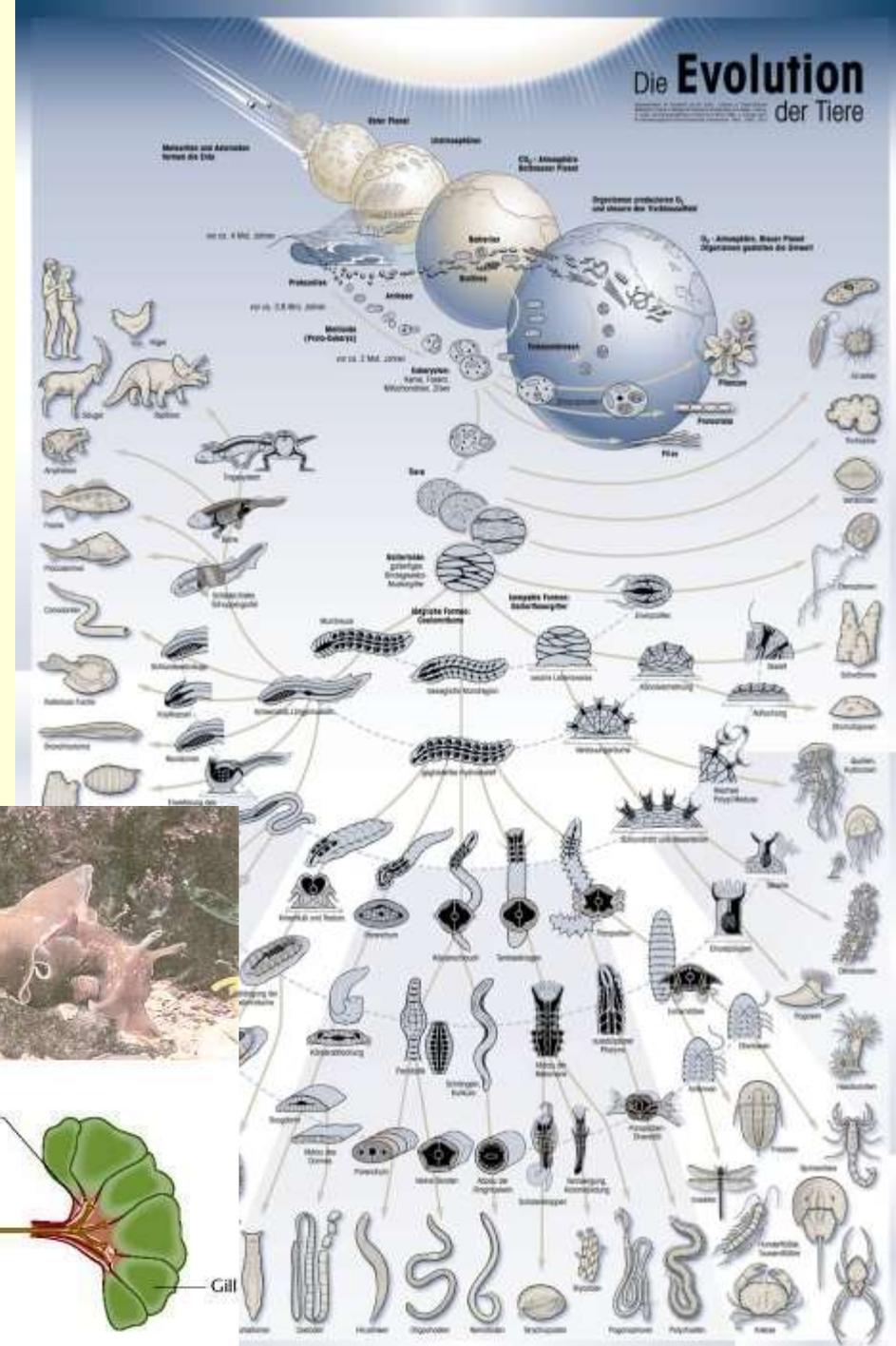
Et progressivement,

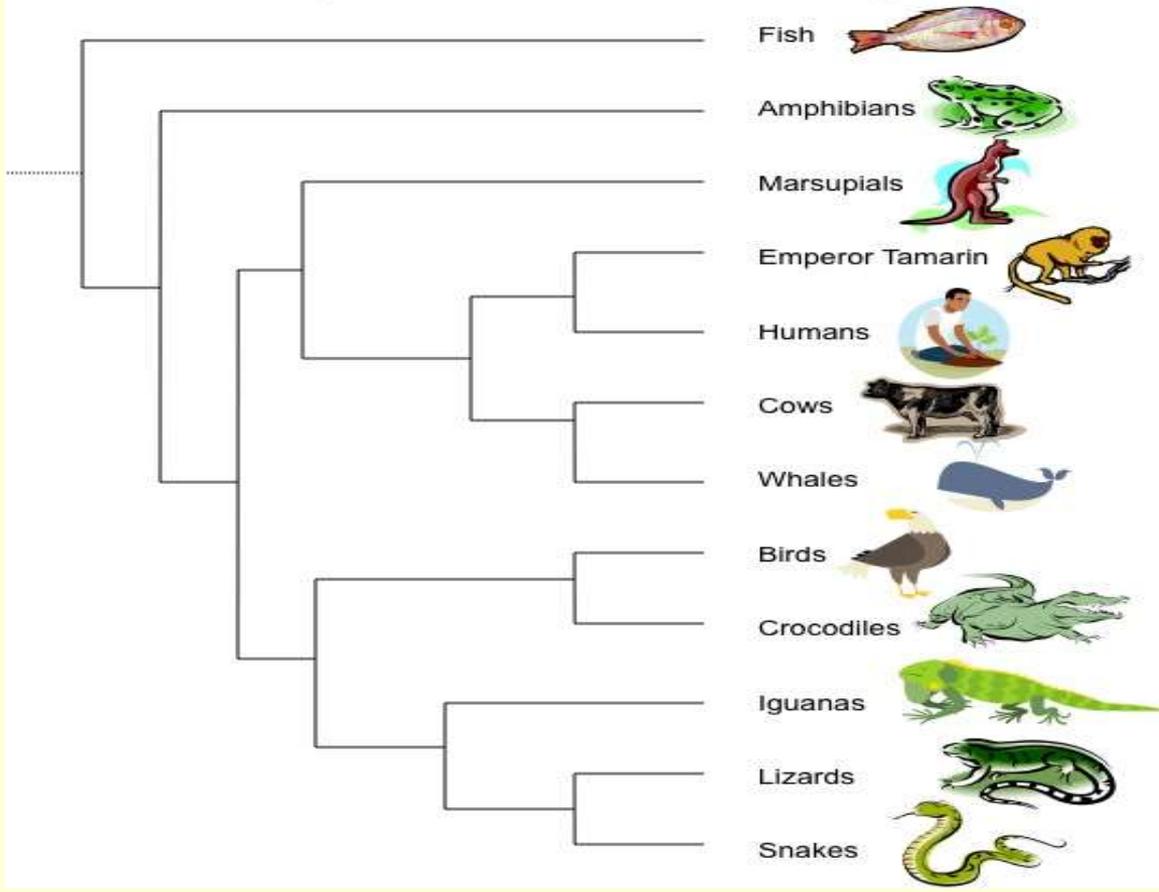
« la logique fondamentale du système nerveux [va devenir] celle d'un **couplage** entre des mouvements et un flux de modulations sensorielles de manière **circulaire**. »

- Francisco Varela, Le cercle créateur, p.126



Pendant des centaines de millions d'années, c'est donc cette boucle-sensorimotrice et ce couplage qui vont se complexifier...





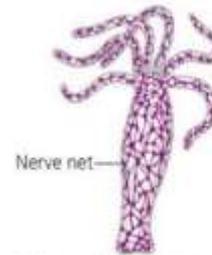
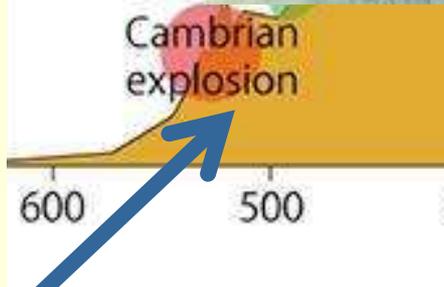
**Les premiers vertébrés (525 Ma)**



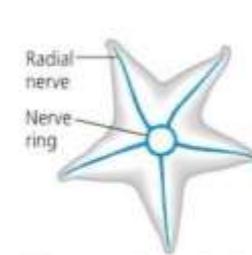
L'un des premiers vertébrés : *Haikouichthys*

Profitions-en tout de suite pour mentionner que chez les **invertébrés** la forme du système nerveux était encore **liée à la forme générale du corps**, à la diversité des organes sensoriels, etc.

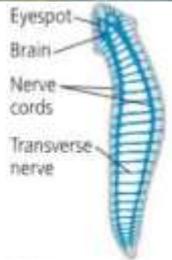
(pas encore de « céphalisation » comme chez les vertébrés)



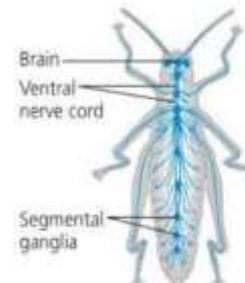
(a) Hydra (cnidarian)



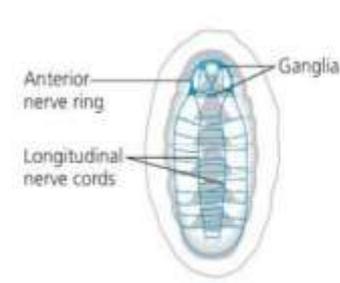
(b) Sea star (echinoderm)



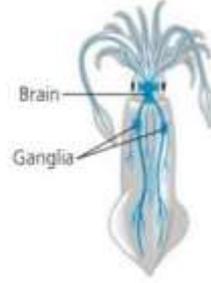
(c) Planarian (flatworm)



(e) Insect (arthropod)



(f) Chiton (mollusc)



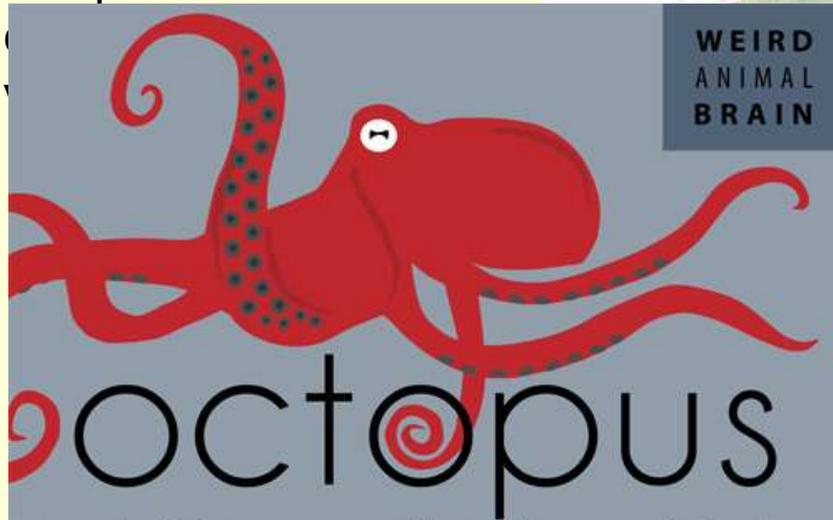
(g) Squid (mollusc)

**Shale de Burgess**  
(508 Ma,  
B-C, Canada)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Burgess\\_Shale](https://en.wikipedia.org/wiki/Burgess_Shale)

Profitons-en tout de suite pour mentionner que chez les **invertébrés** la forme du système nerveux était encore **liée à la forme générale du corps**, à la diversité des organes sensoriels, etc.

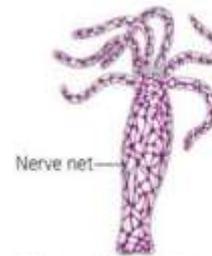
(pas encore de « céphalisation »)



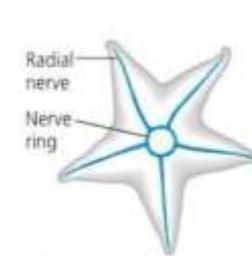
17 juillet 2018

Les cerveaux souvent étranges des autres animaux

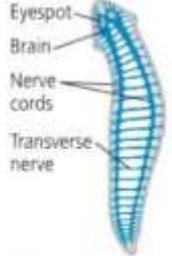
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2018/07/17/les-cerveaux-souvent-etranges-des-autres-animaux/>



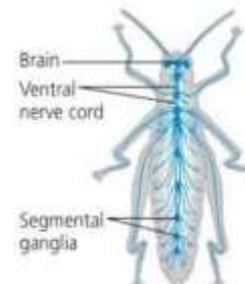
(a) Hydra (cnidarian)



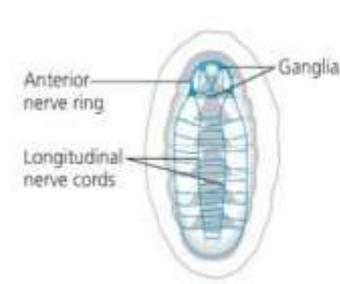
(b) Sea star (echinoderm)



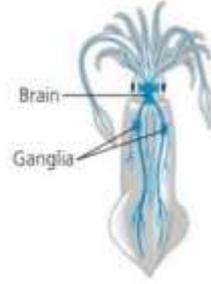
(c) Planarian (flatworm)



(e) Insect (arthropod)



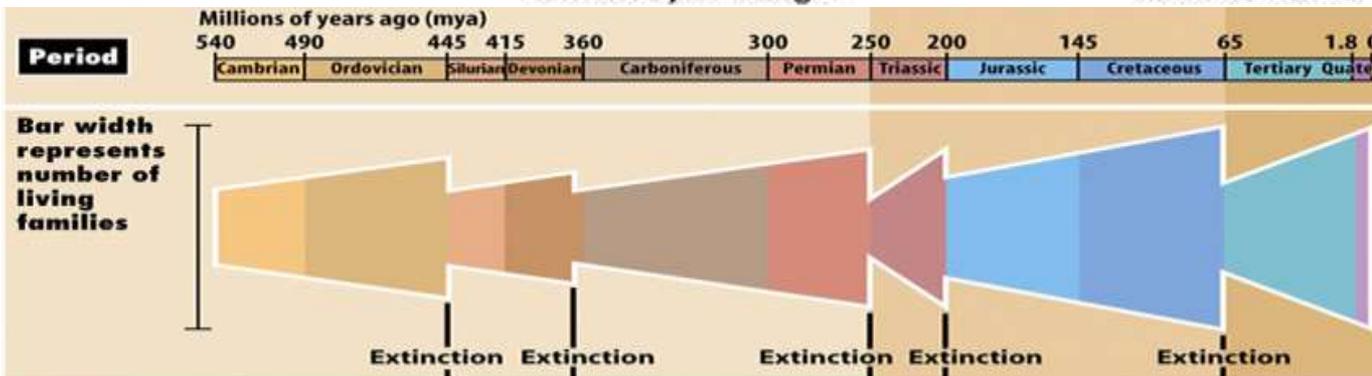
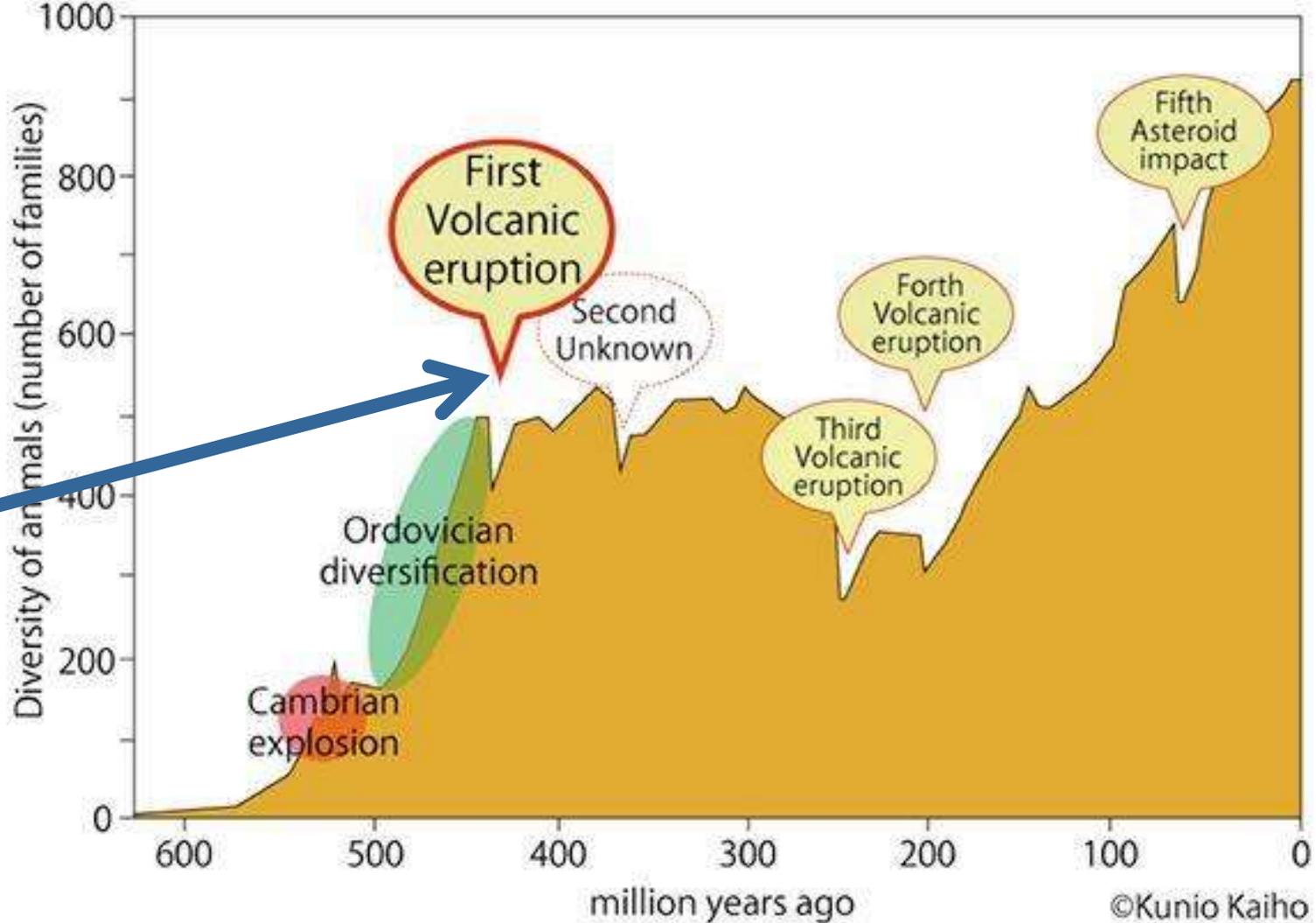
(f) Chiton (mollusc)



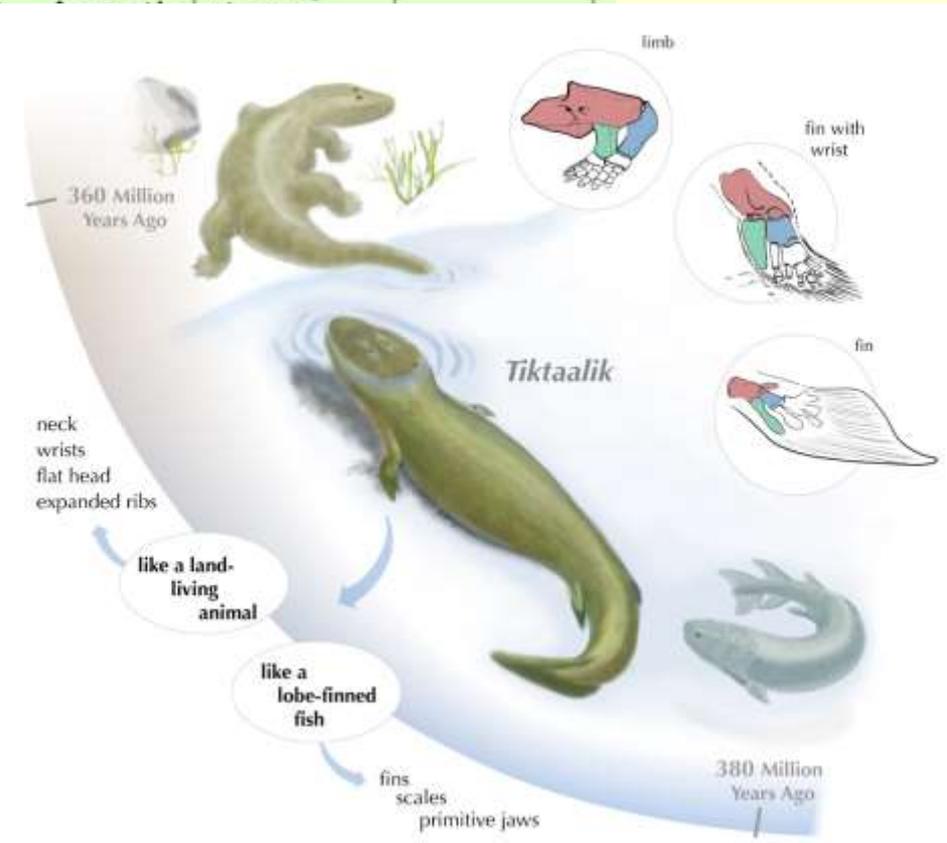
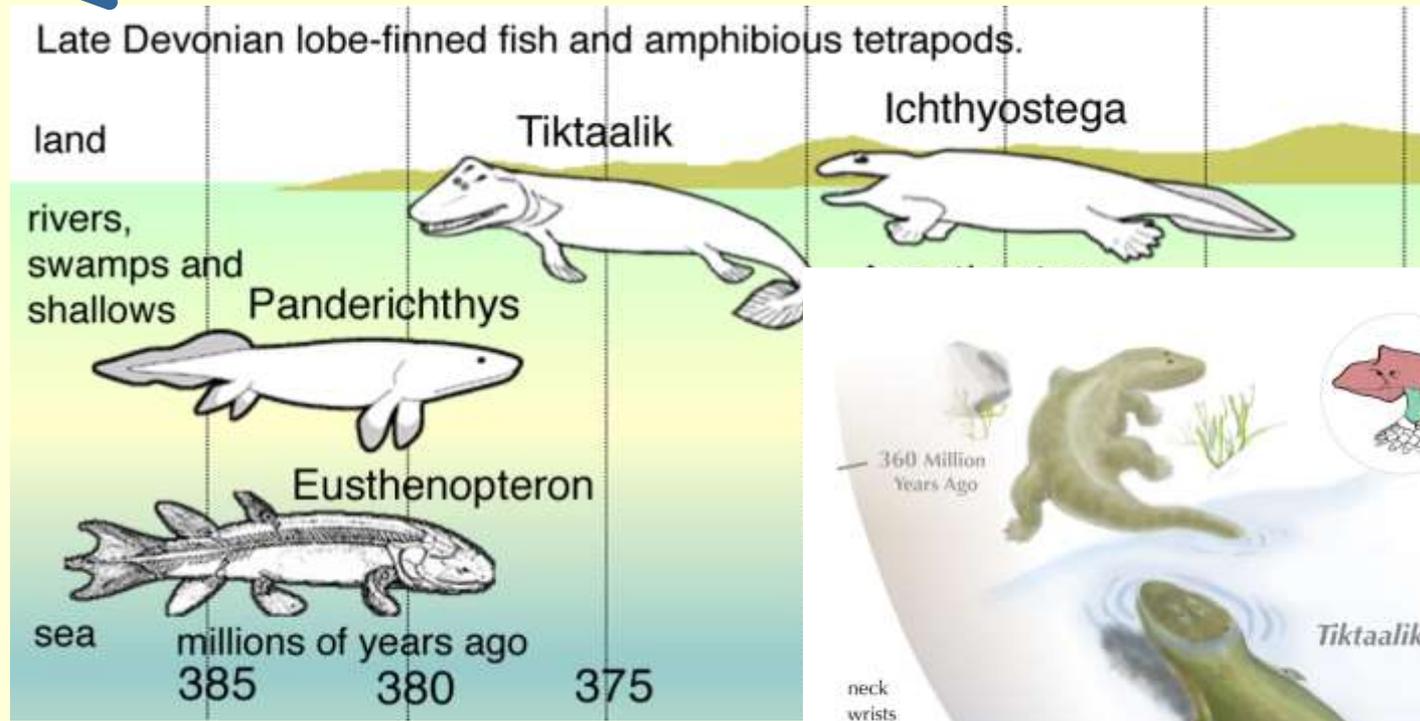
(g) Squid (mollusc)

Il y a environ **435 millions** d'années, une proportion importante des espèces qui vivaient sur Terre ont disparu lors de la **première grande extinction de masse du vivant.**

C'est dans les roches de **l'île d'Anticosti** au Québec qu'on le constate le mieux.



<http://ici.radio-canada.ca/tele/decouverte/2014-2015/segments/reportage/986/fossiles-anticosti>

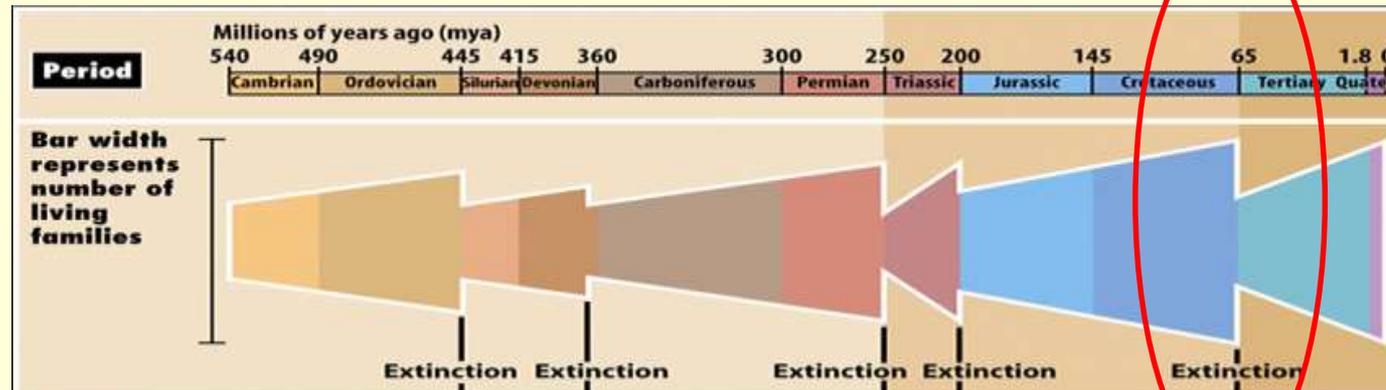


**380 - 365 Ma :**

**Les premiers tétrapodes sortent de l'eau et s'adaptent à la vie terrestre**



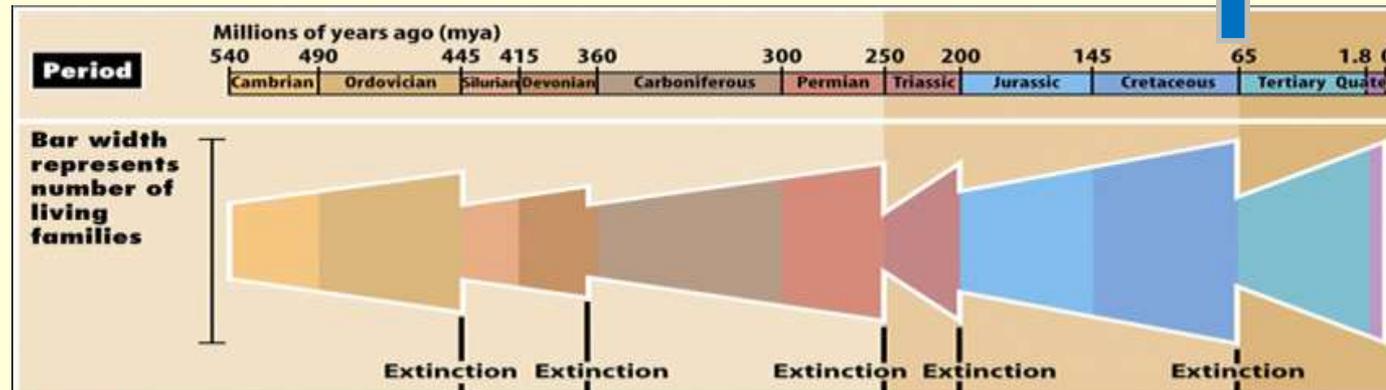
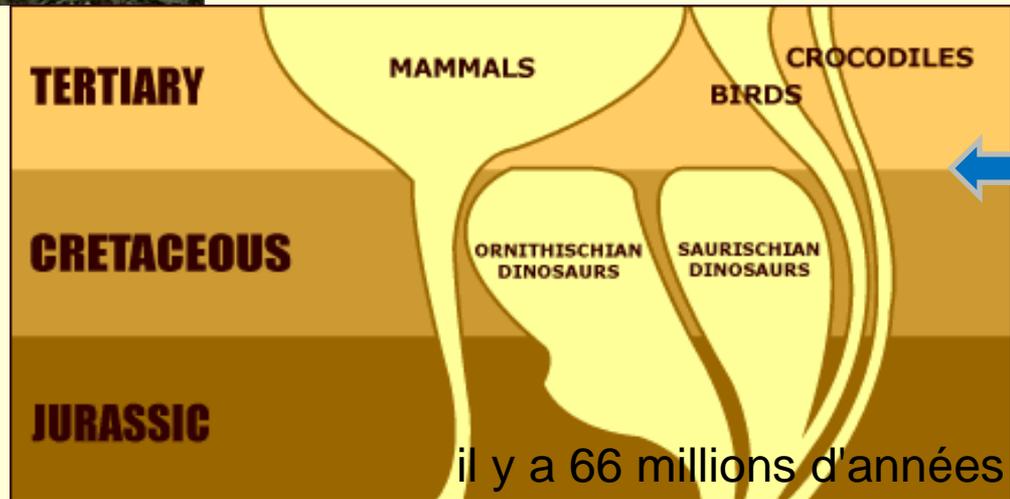
il y a 66 millions d'années...

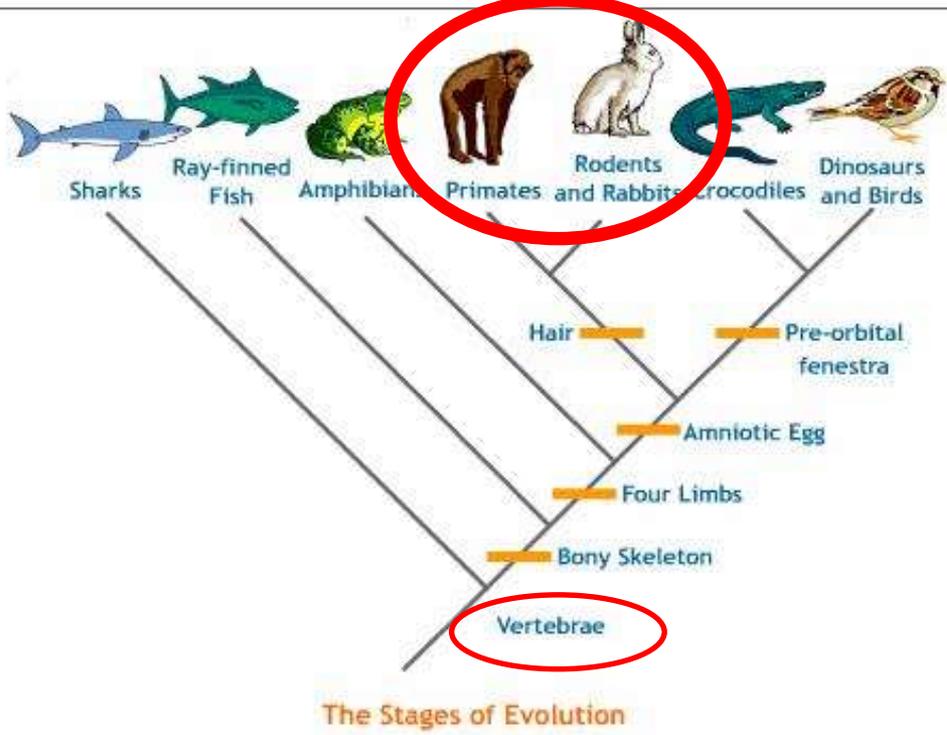




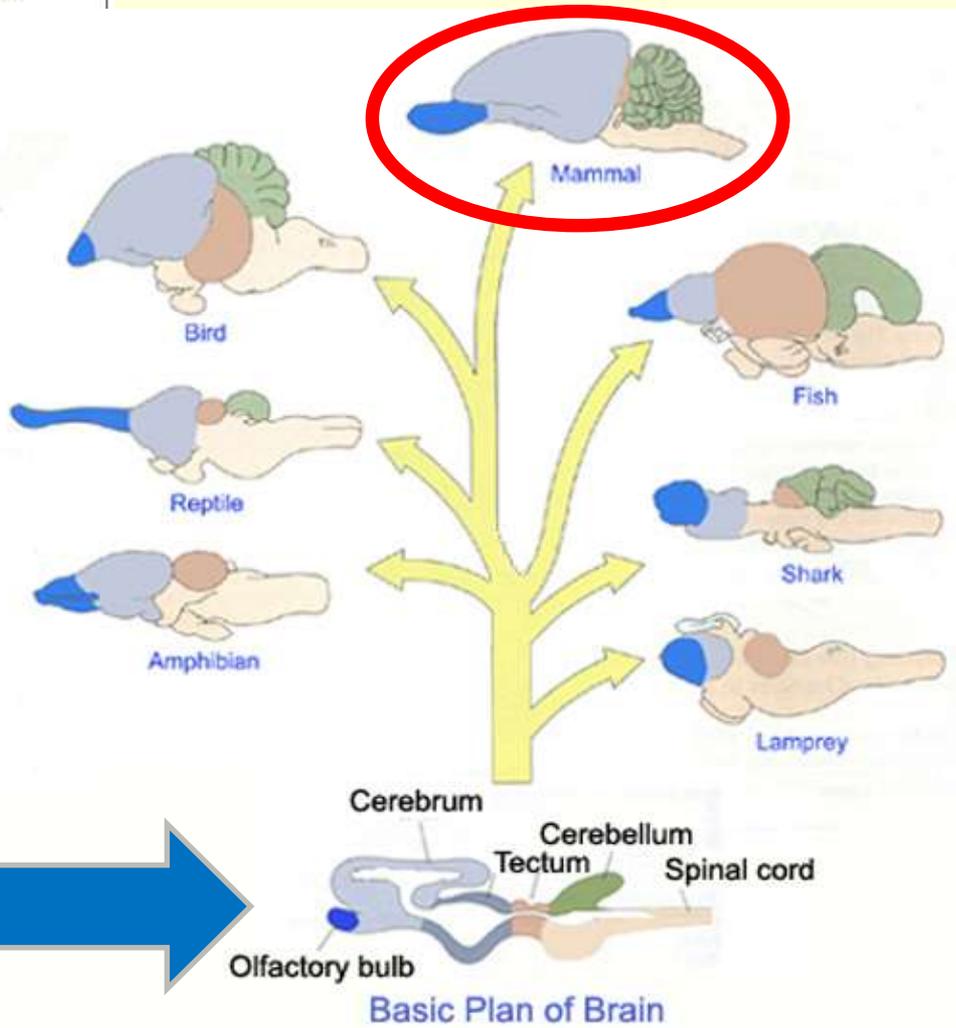
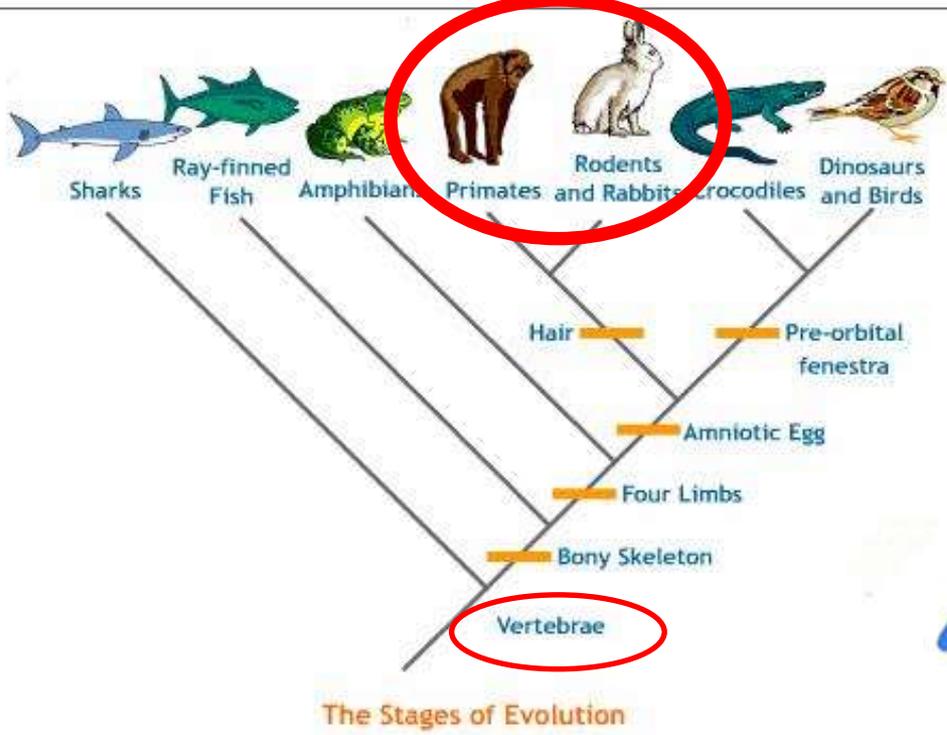
# Rise of the mammals began before dinosaur extinction, research suggests

<https://www.theguardian.com/science/2016/jun/08/rise-of-the-mammals-began-before-dinosaur-extinction-research-suggests>





Quelle tendance va apparaître dans les systèmes nerveux des vertébrés ?



Chez les vertébrés :

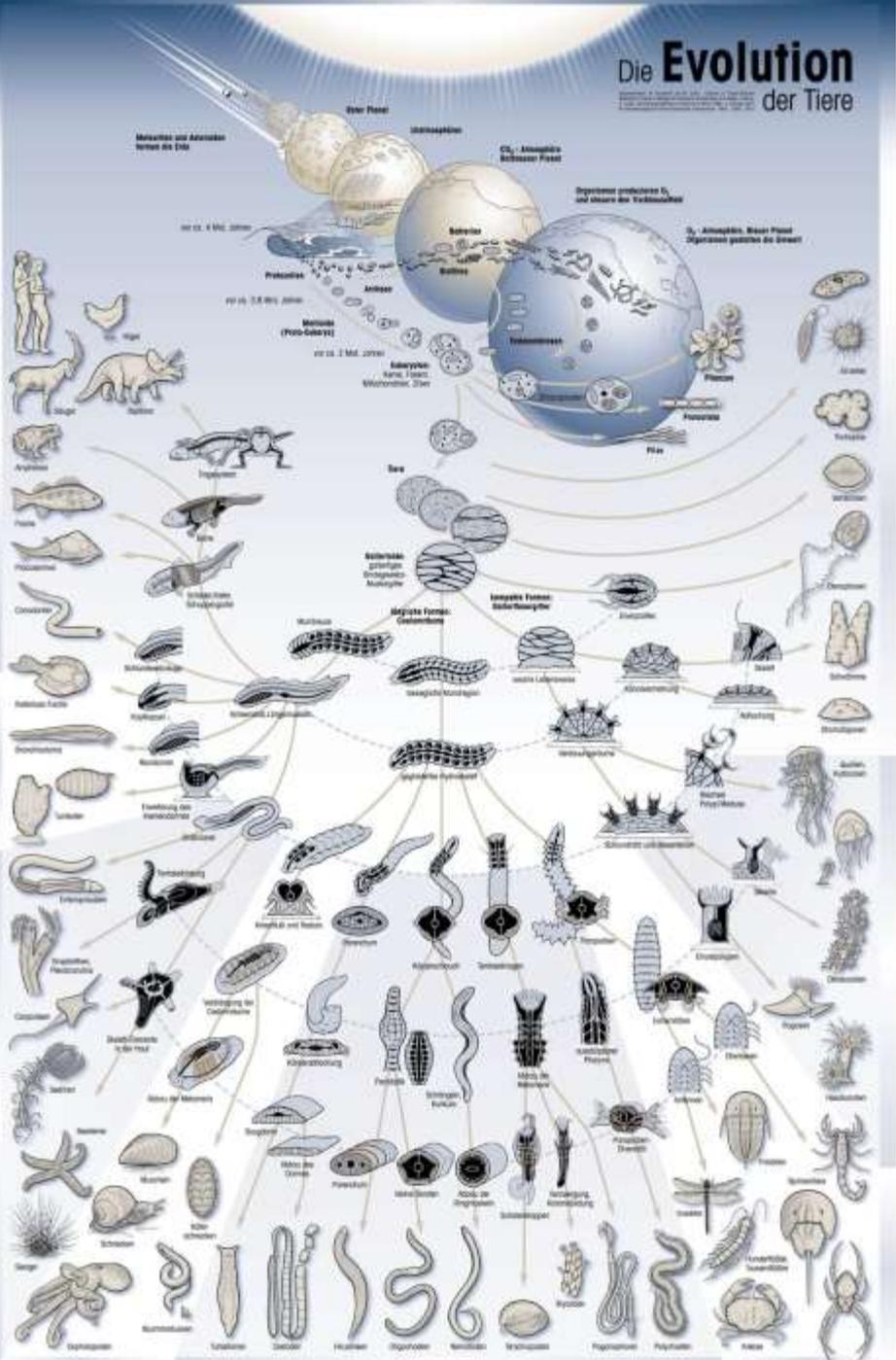
« **céphalisation** » **croissante**  
 (les neurones se concentrent dans un cerveau)

à partir d'un modèle commun



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

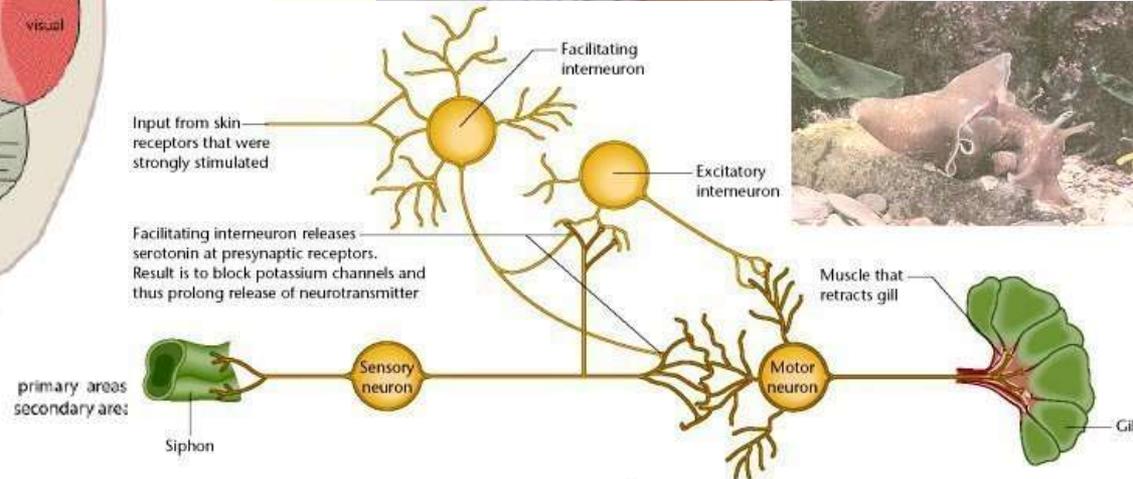
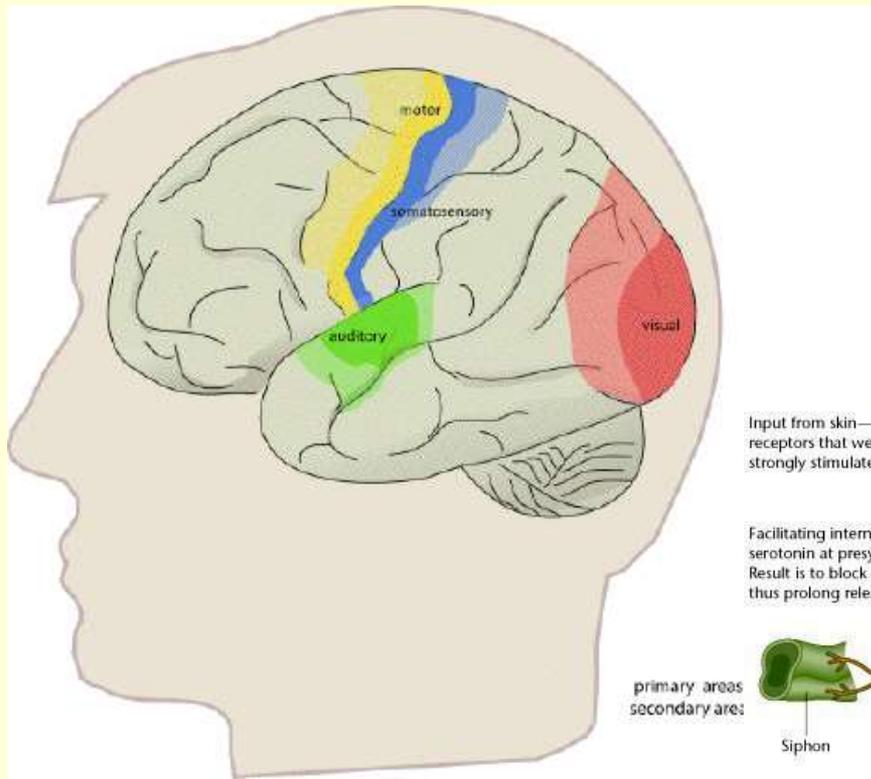
...et l'une des variantes du cerveau de primate sera le nôtre !



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

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

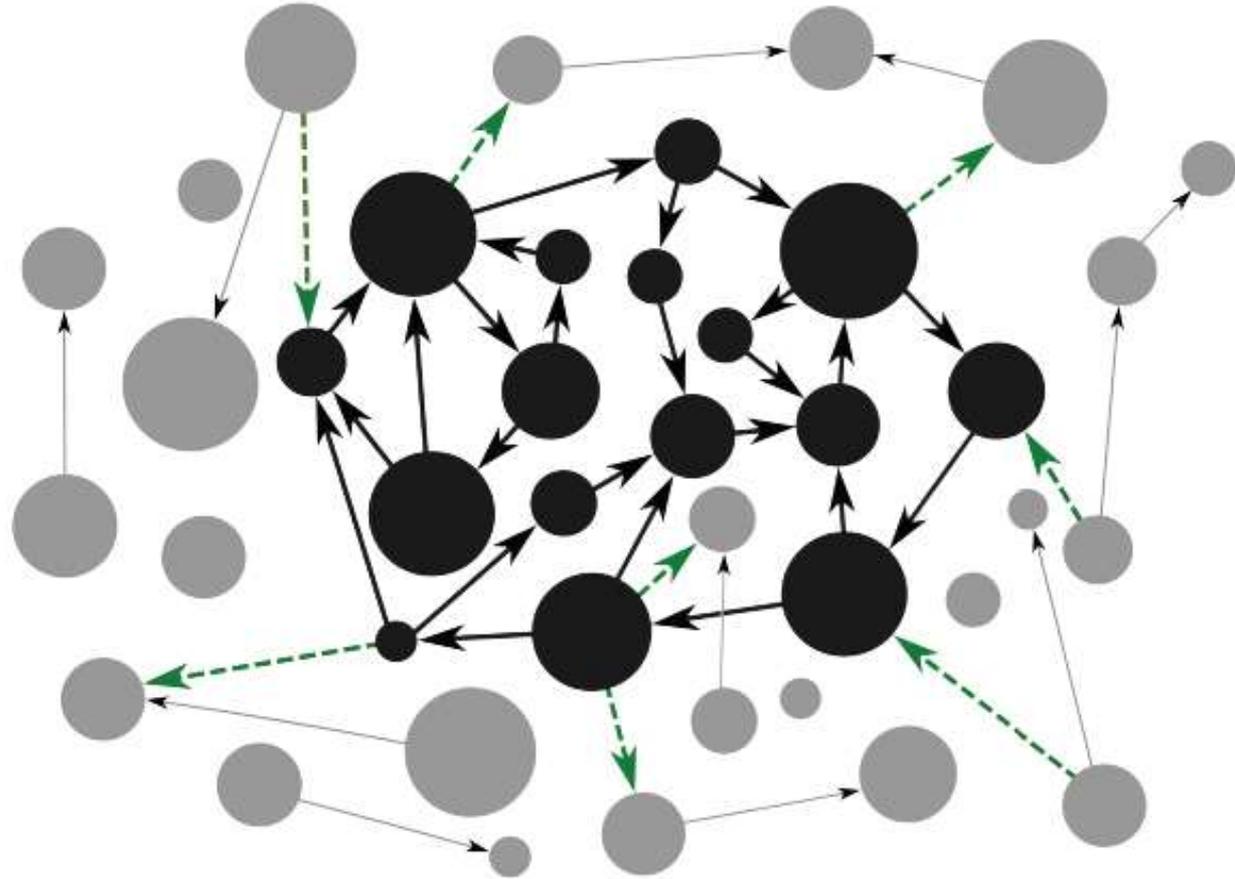
comme les inter-neurones de l'aplysie.



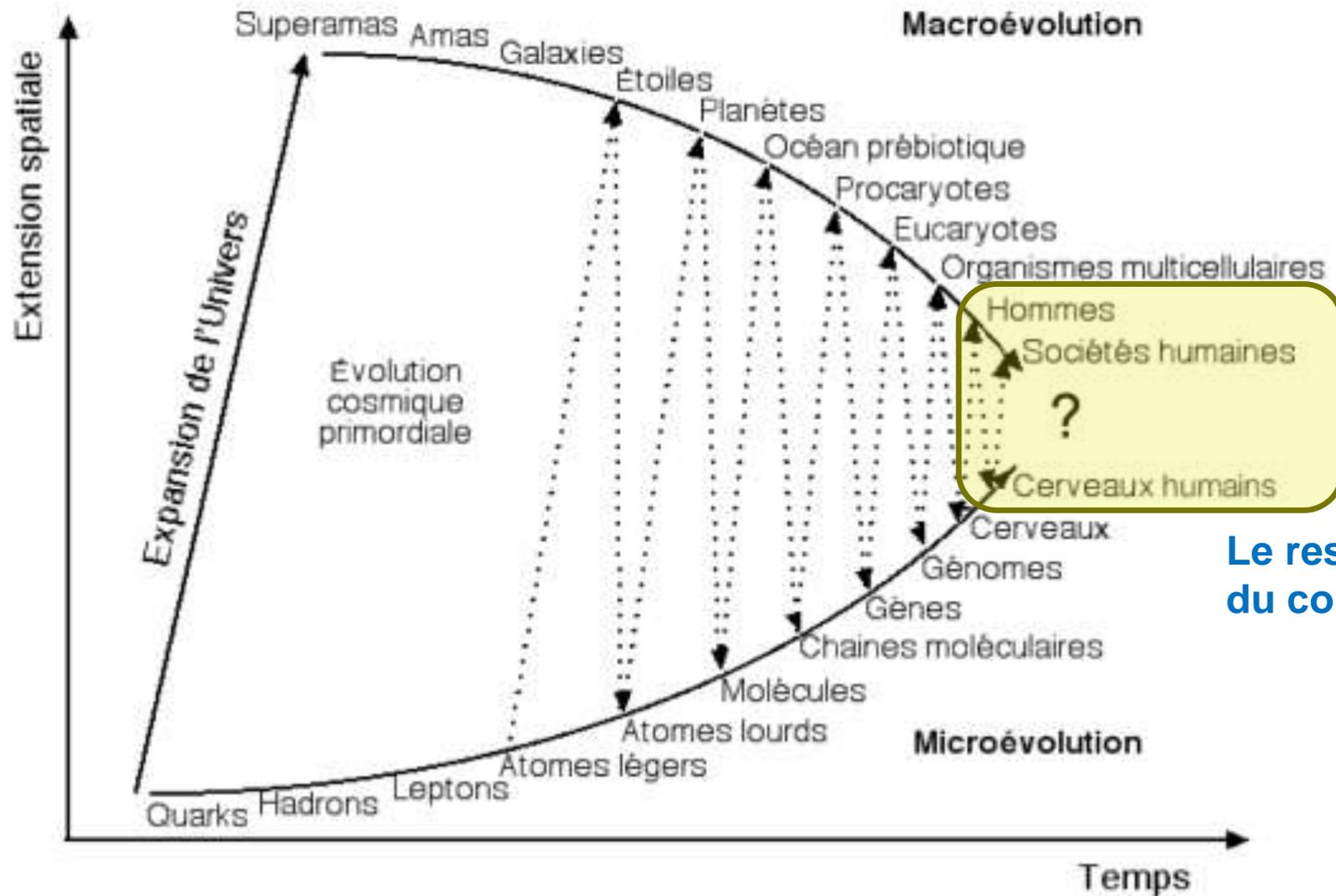
**En noir** : un cerveau

dont les différents neurones interagissent préférentiellement entre eux

(mais c'est toujours un « système ouvert » du point de vue thermodynamique)



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)



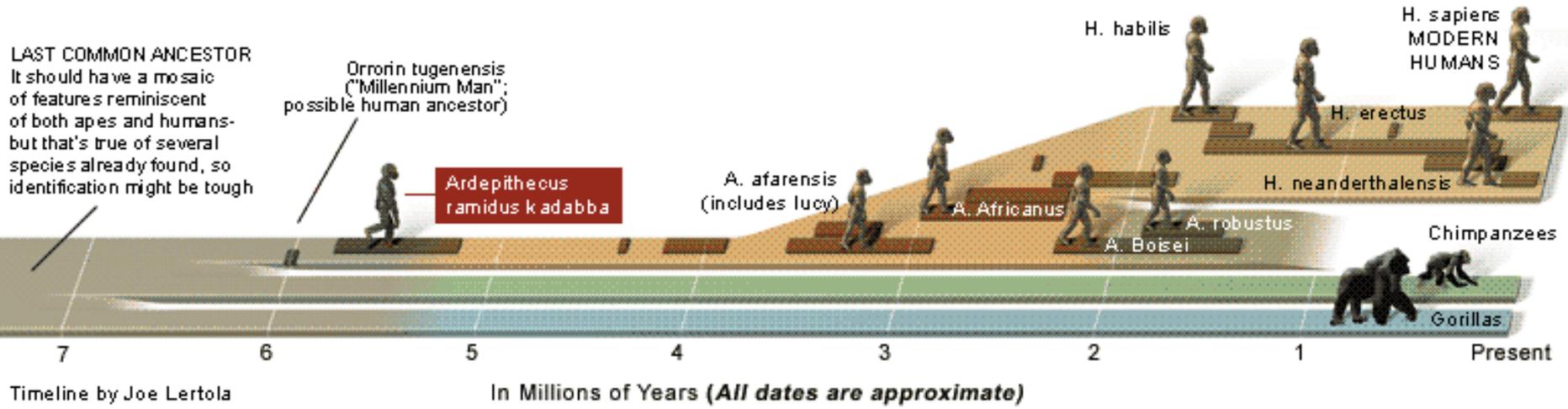
Le reste  
du cours !

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

# A WALK THROUGH HUMAN EVOLUTION

The newest fossils have brought scientists tantalizingly close to the time when humans first walked upright—splitting off from the chimpanzees. Their best guess now is that it happened at least 6 million years ago [Click here to read the cover story >>](#)

LAST COMMON ANCESTOR  
It should have a mosaic of features reminiscent of both apes and humans—but that's true of several species already found, so identification might be tough



## Cours 1:

Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)

A- Vue d'ensemble et niveaux d'organisation

B- Du Big Bang aux primates (- 13,7 milliards d'années à - 65 millions d'années)

## Cours 2:

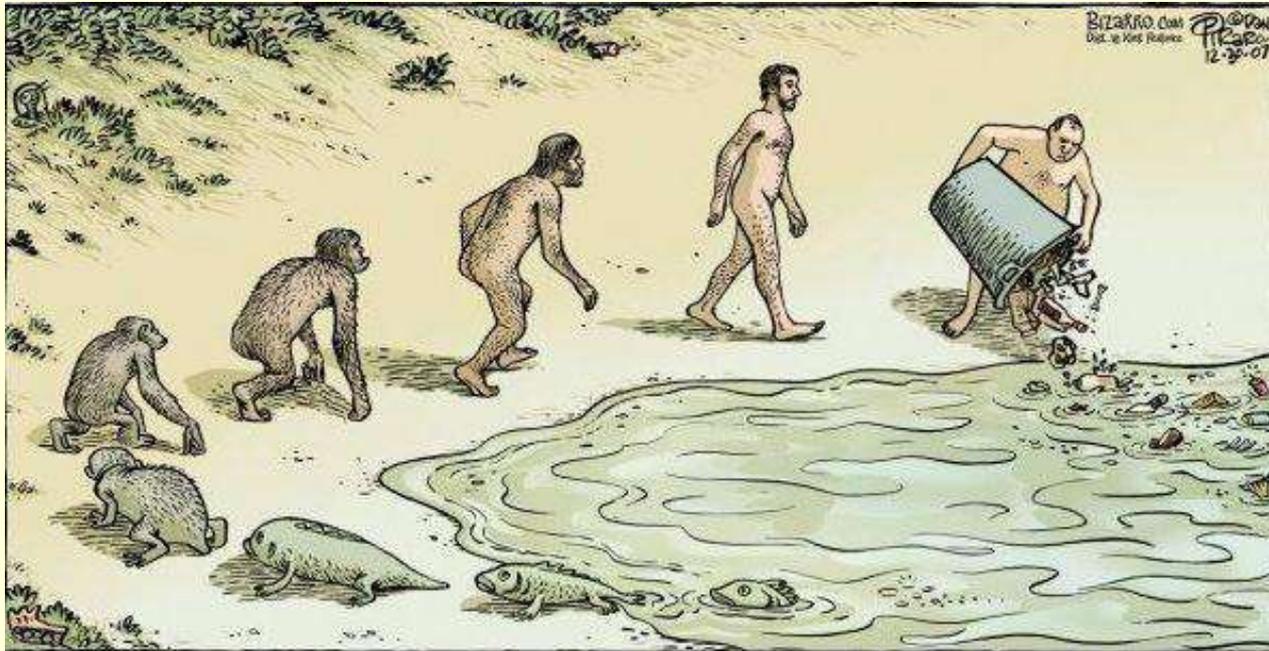
Un neurone, deux neurones, quelques neurones (la grammaire de base du cerveau)

A- Des primates aux sociétés humaines (de - 65 millions d'années à 1900)

B- De la théorie du neurone au piège du « cerveau-ordinateur » (1900-1980)

La question est peut-être au fond de savoir si la complexité va continuer de croître dans l'univers et si une forme de conscience sera là pour s'en rendre compte !

Ou si elle va s'arrêter avec le « summum de l'intelligence » qu'elle semble avoir atteint...





**La Terre est âgée de 4,6 milliards d'années. Ramenons ça à 46 ans. Nous sommes là depuis 4 heures. Notre révolution industrielle a commencée il y a 1 minute. Dans cet intervalle, nous avons détruit plus de 50% des forêts de la planète.**