

**Séance 2 (14 septembre) :**  
**Autopoïèse et émergence des systèmes nerveux**

**Cours :**

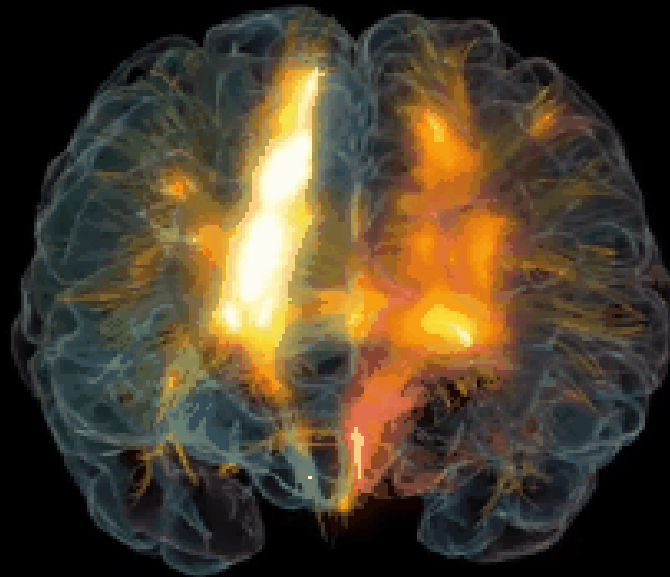
Big history; évolution cosmique et chimique  
Matière versus forme, (auto)-organisation  
Autopoïèse et évolution biologique  
Émergence des systèmes nerveux

**Article :**

Mind in Life. Biology, Phenomenology, and the Sciences of Mind,  
Evan Thompson, 2007, **p.140 à 165**

(Autopoiesis and Teleology; Needful Freedom and the Selfhood of the Organism;  
Identity and Self-Making; The Self-Transcendence of the Organism; The Deep  
continuity of Life and Mind; Life Can Be Known Only by Life)

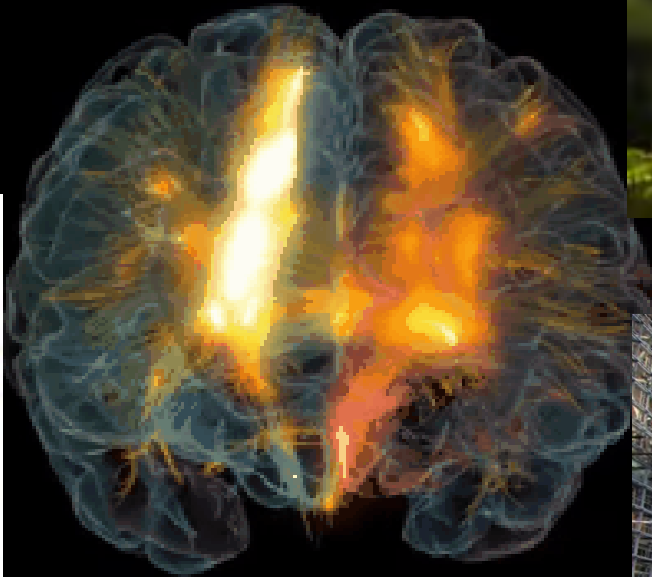
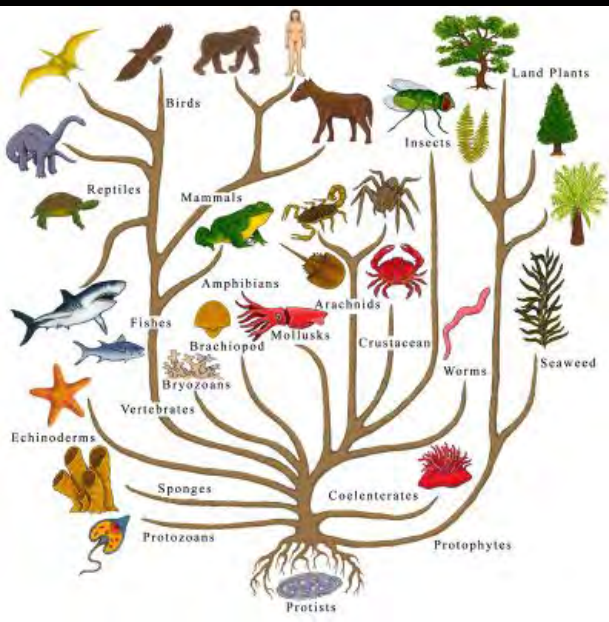
On dit que le cerveau humain, avec son activité dynamique incessante, est probablement l'objet le plus complexe de l'univers connu



Mais c'est pas juste le cerveau qui est complexe,  
c'est toute la **vie** et **l'évolution** avant lui  
qui lui permettent de **se développer** dans un **corps**  
et de s'intégrer dans un **environnement** tout aussi complexe.



Voilà un résumé  
du cours...



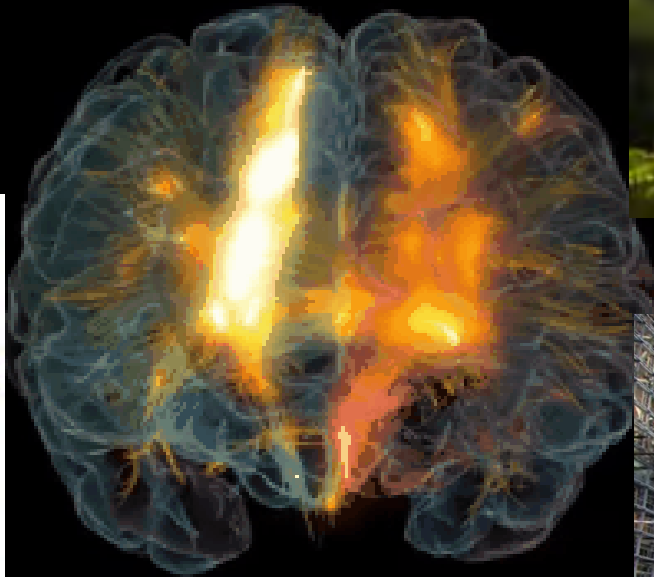
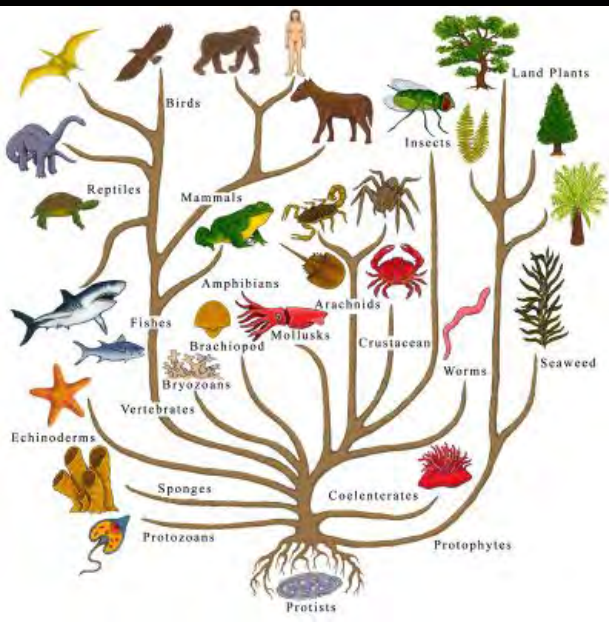
...en une diapo !



Un cours qui a l'ambition de s'intituler « la cognition incarnée » se doit donc, il me semble, de commencer par se demander un peu **qu'est-ce que la vie, comment elle a commencé, et quel rapport entretient-elle avec la cognition ?**



Voilà un résumé  
du cours...



...en une diapo !



## Big History

Où l'on va résumer en une heure 13,7 milliards d'années d'évolution **cosmique, chimique et biologique** !



« 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 !)

$10^{29}$

100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000

Évolution  
cosmique

Évolution  
chimique

Évolution  
biologique

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

On va partir de la **thermodynamique** et à la dernière séance on va boucler la boucle et y revenir avec le **codage prédictif** et le « **free energy principle** ».



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

Et...

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

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







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



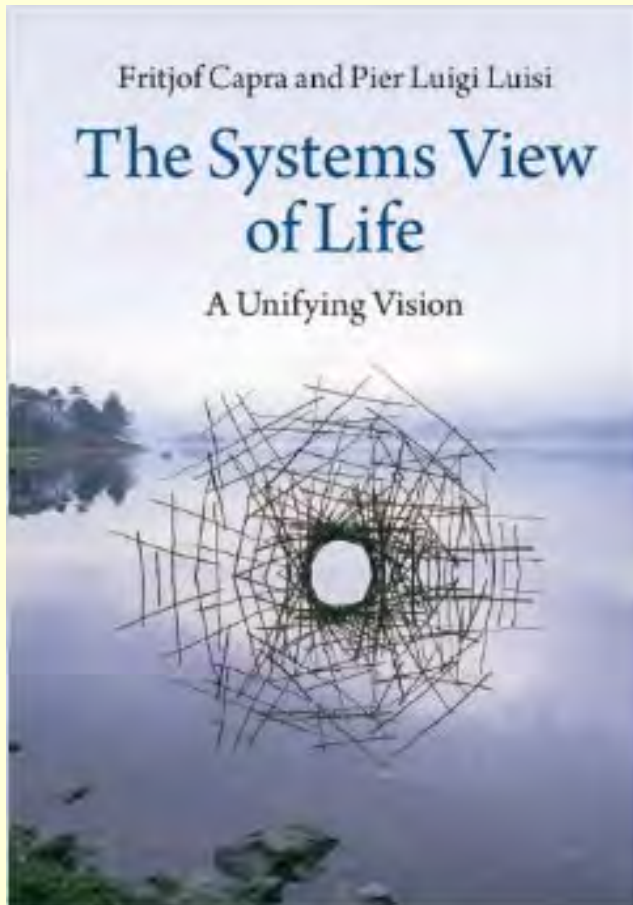
...parce qu'il continue d'y avoir croissance du désordre à l'échelle de l'univers.

Cette croissance de complexité (et donc baisse d'entropie, de désordre) s'observe dans des **systèmes ouverts** (du point de vue thermodynamique),

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

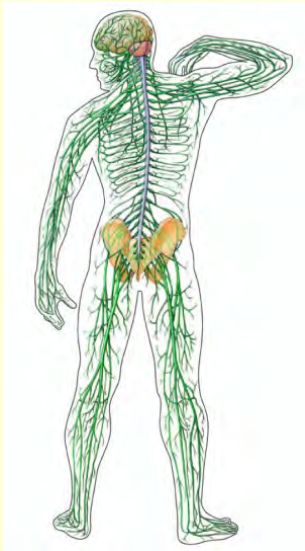
“Such islands of order in a sea of disorder” are characteristic of the “**dissipative structures**” of living systems.

- The Systems View of Life



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

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



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

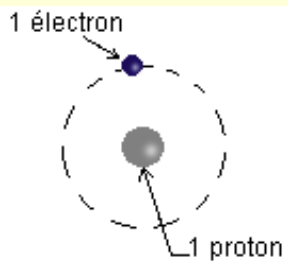




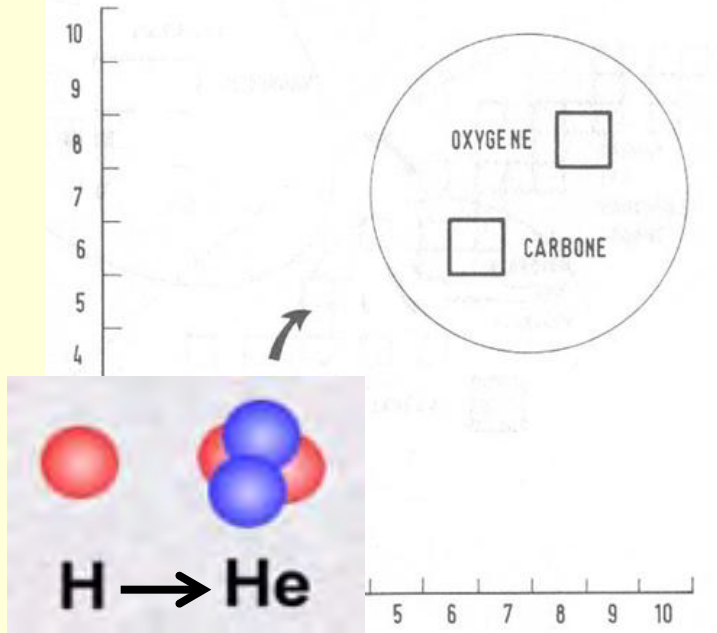
- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?

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

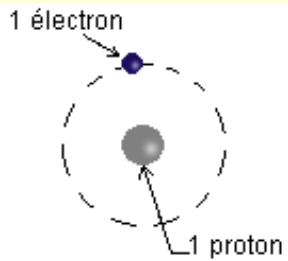
C'est justement leur forme, leur pattern d'organisation qui va les différencier...



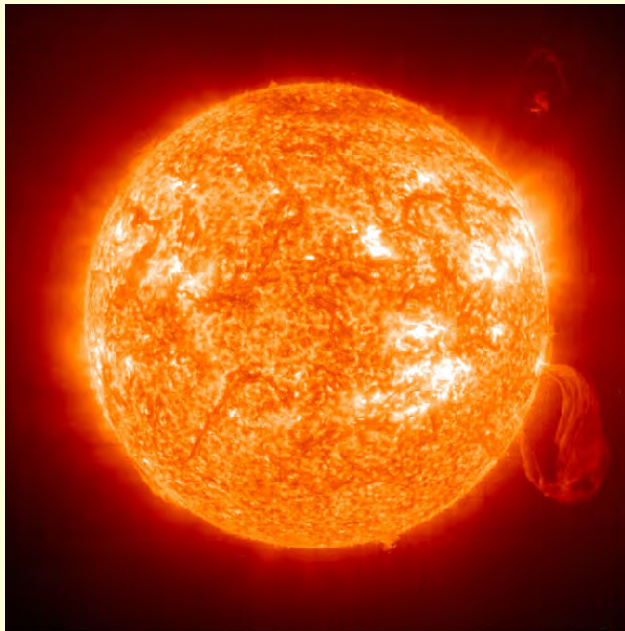
# Combustion de l'hélium



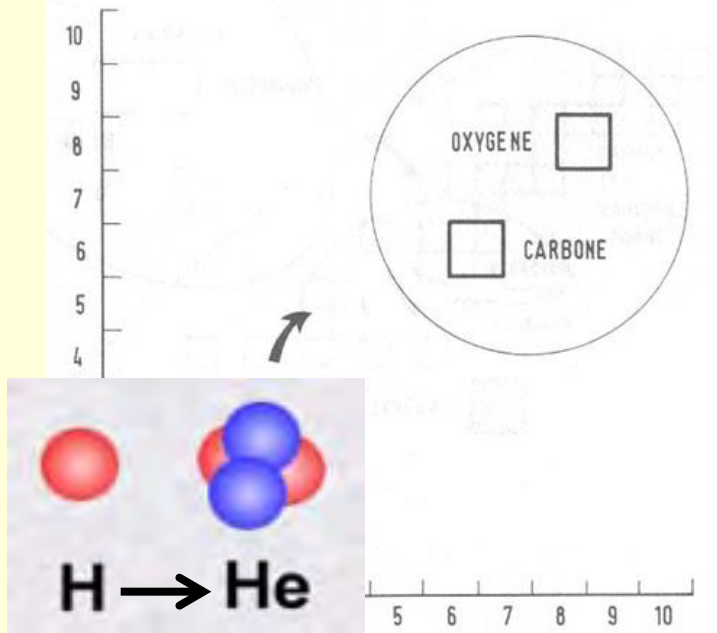
- l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?



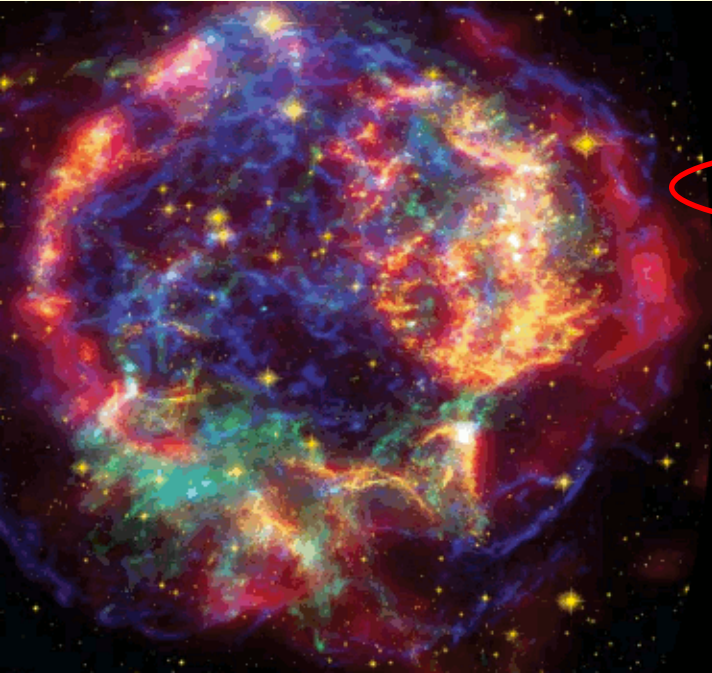
Hydrogène



# Combustion de l'hélium



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



**Elles s'éclatent pour vous!**

Sans les étoiles mortes, vous ne seriez pas là.

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

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

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

# Tableau Périodique des Éléments

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

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

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

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

57 La Lanthane 138.9055	58 Ce Cérium 140.116	59 Pr Praséodyme 140.90765	60 Nd Néodyme 144.24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutécium 174.967
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Américium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobélium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

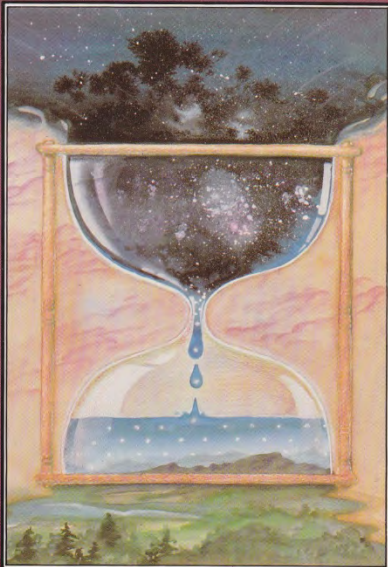
Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

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

Hubert Reeves

# PATIENCE DANS L'AZUR

L'ÉVOLUTION COSMIQUE



QUÉBEC SCIENCE  
ÉDITEUR

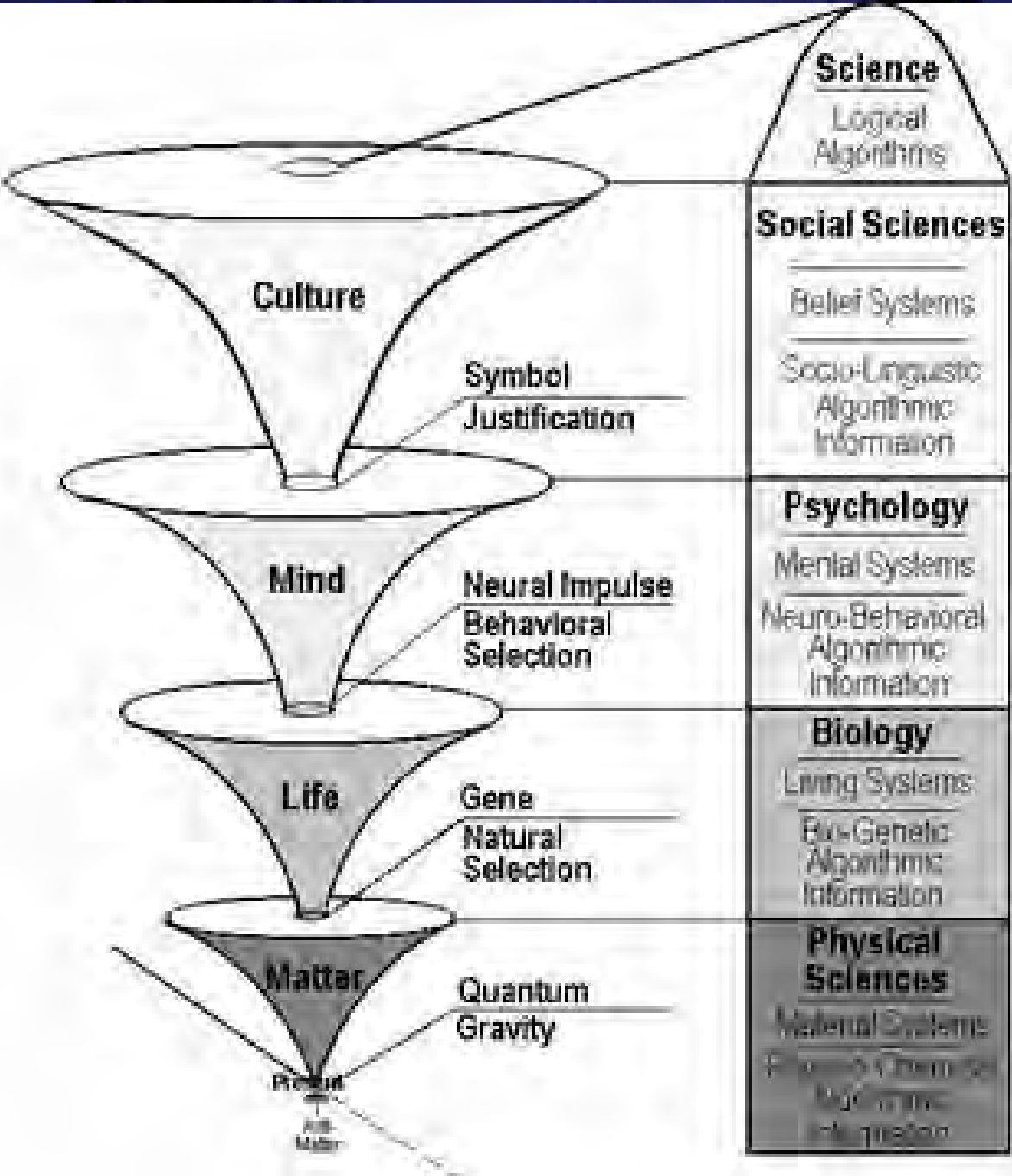
(1981)

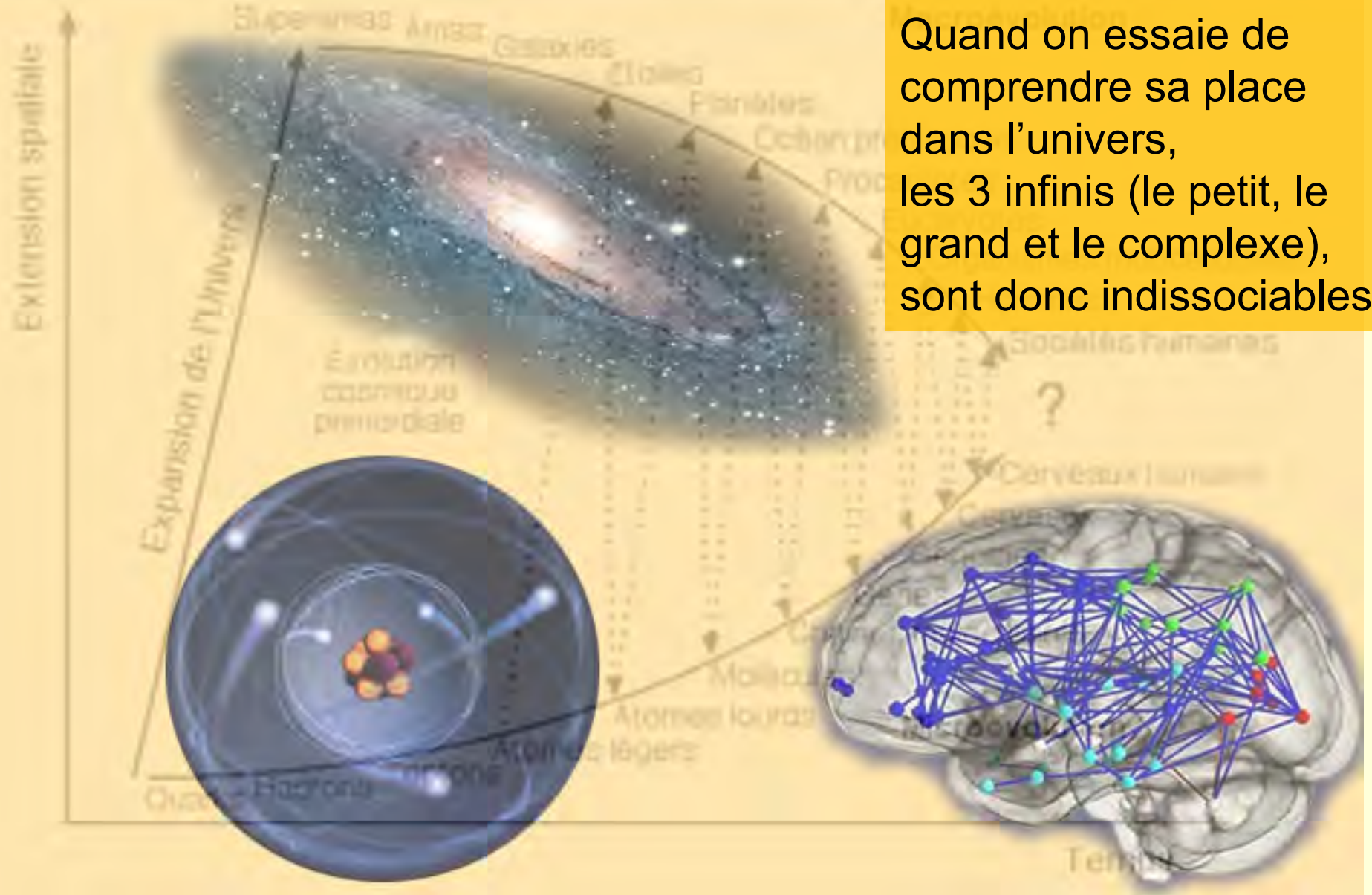
## BIG HISTORY PROJECT





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

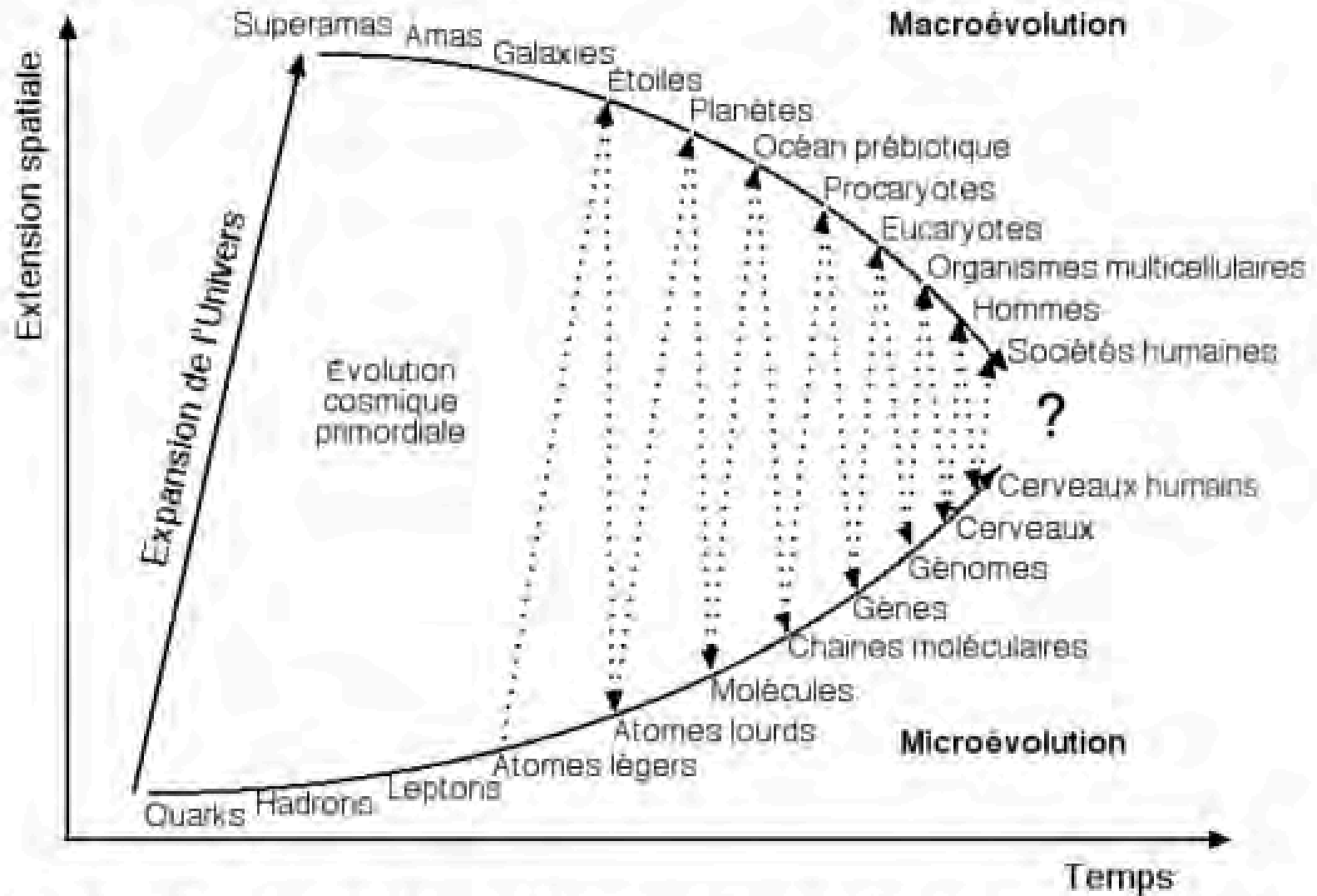




Quand on essaie de comprendre sa place dans l'univers, les 3 infinis (le petit, le grand et le complexe), sont donc indissociables.

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

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

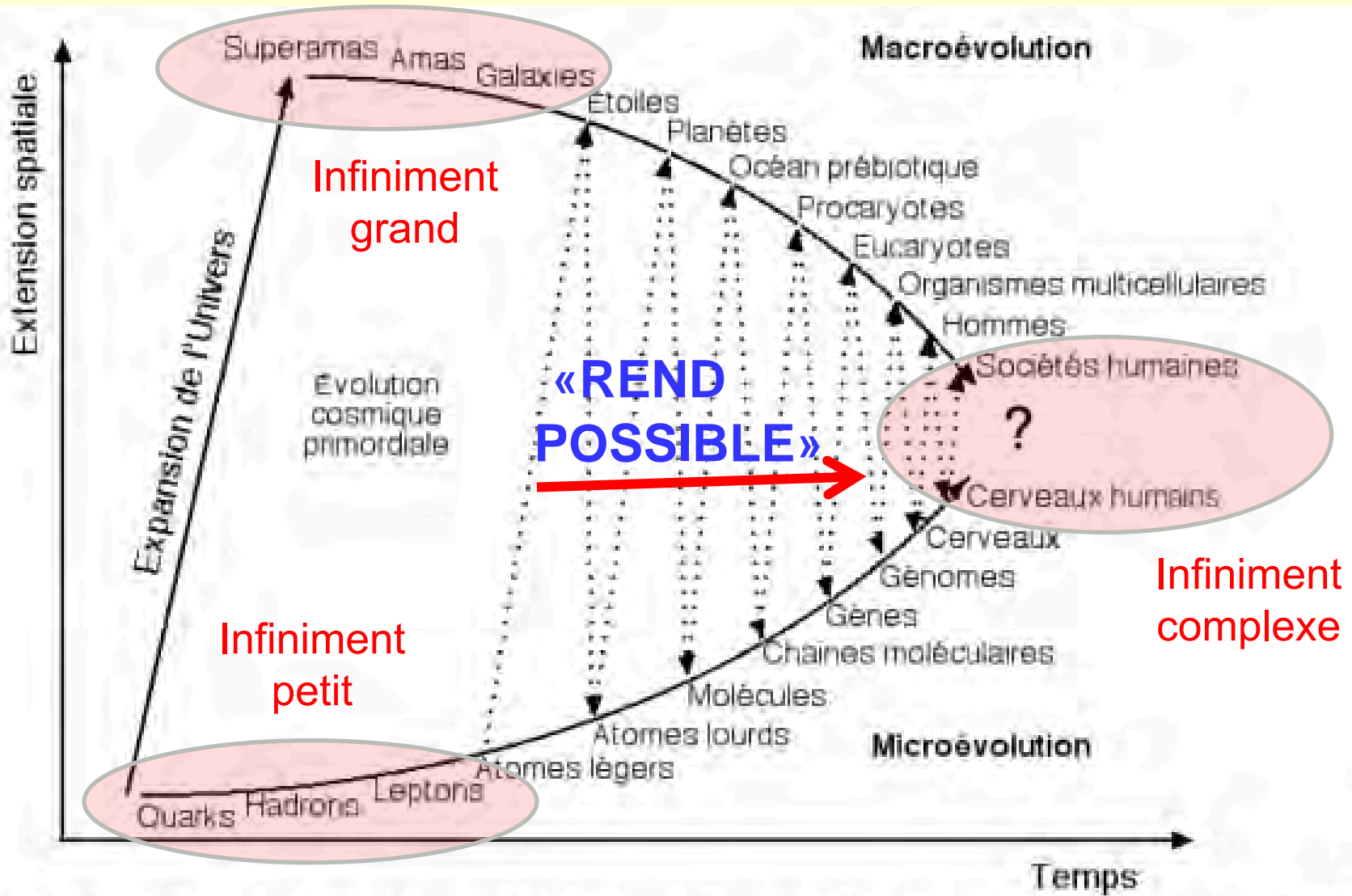


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

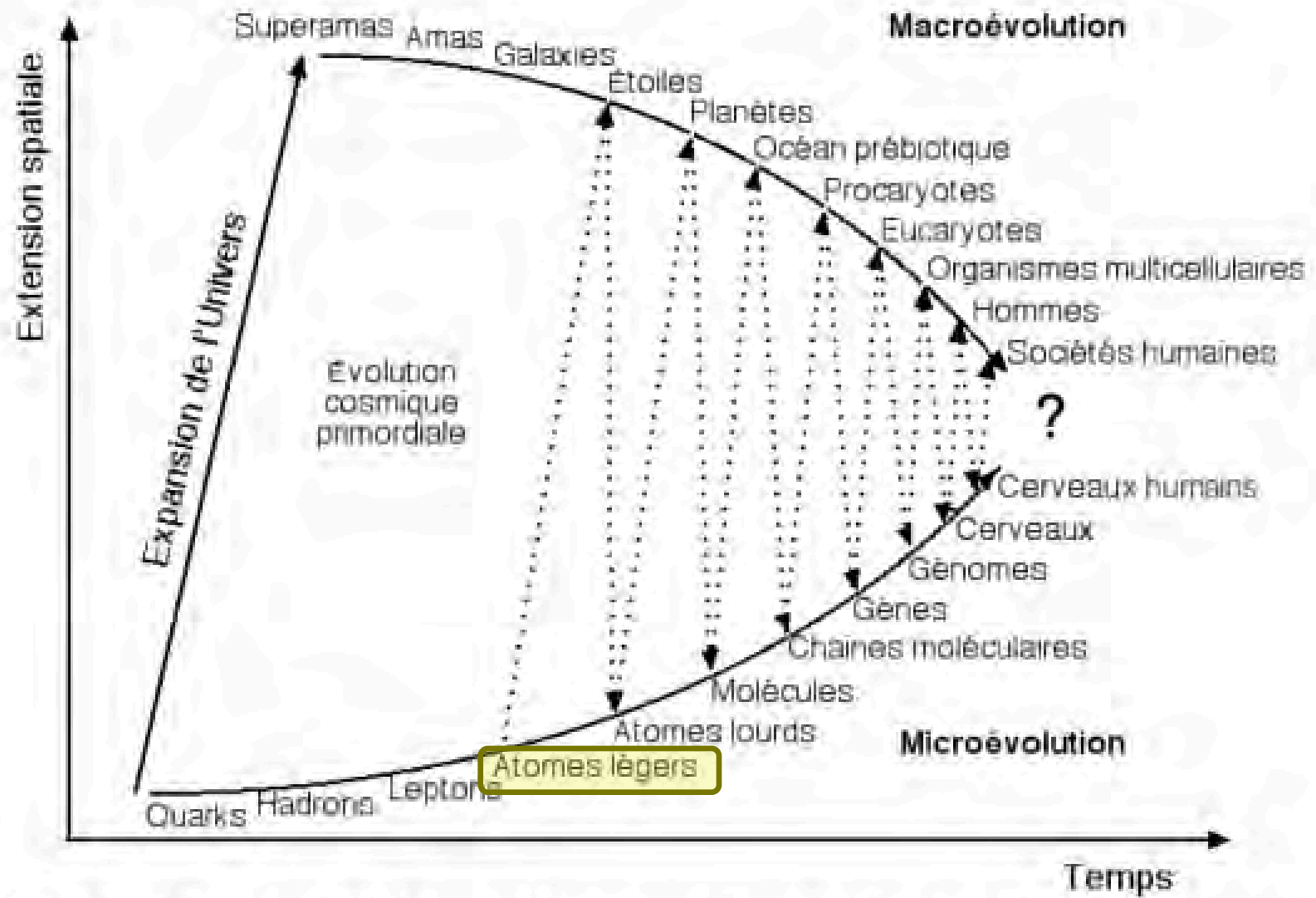
Université du troisième âge des Laurentides et de Boucherville (21 janvier - 15 mars 2016)

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

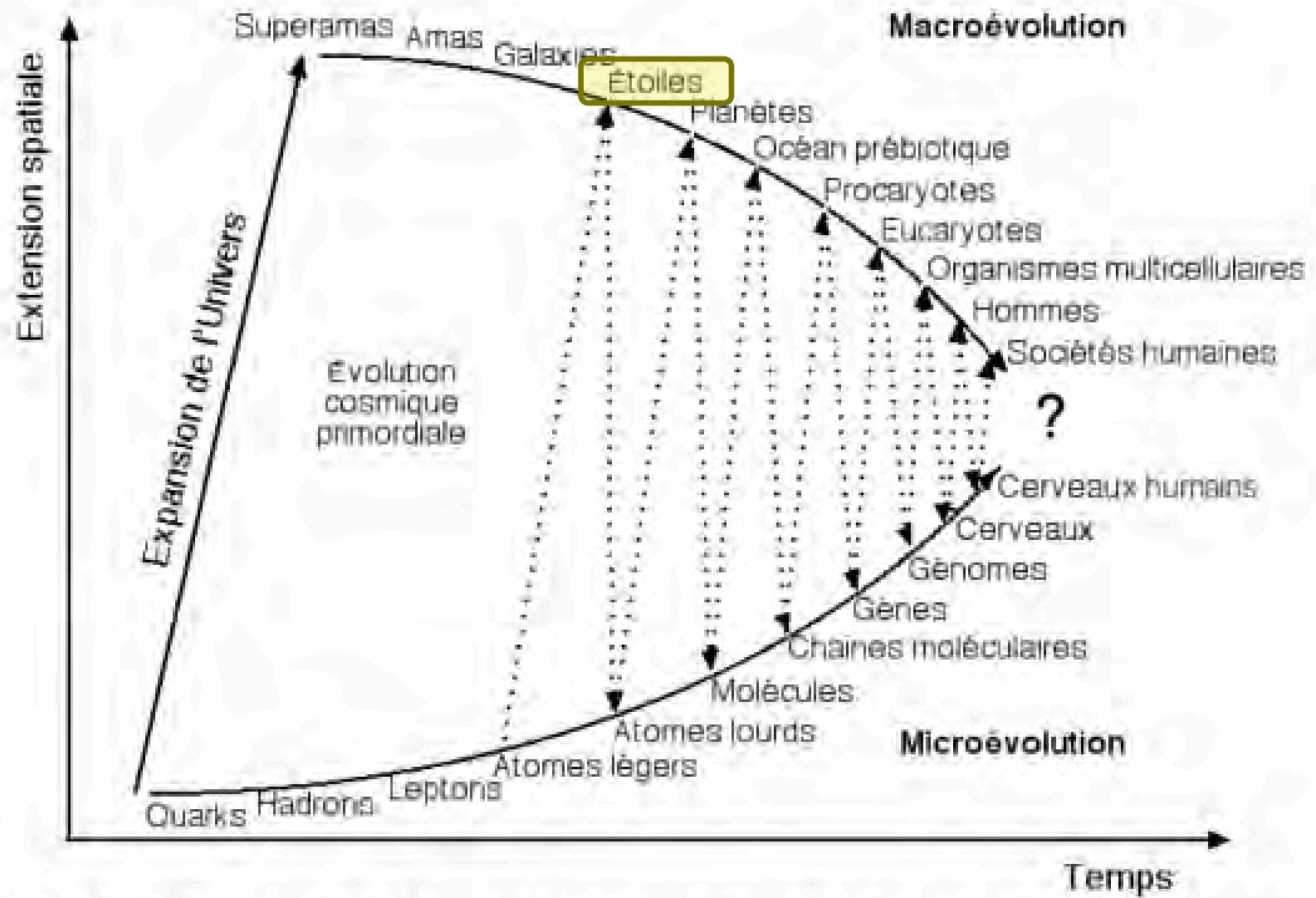
[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop\\_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%201%20-%20A-%20Multidisciplinarit%E9%20des%20sciences%20cognitives%20-%20B-%20%C9volution%20-%20aut%202015%20-%20pour%20pdf.pdf](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop_pres/UTA%20Lau-Bou%20-%20cours%201%20-%20A-%20Multidisciplinarit%E9%20des%20sciences%20cognitives%20-%20B-%20%C9volutio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



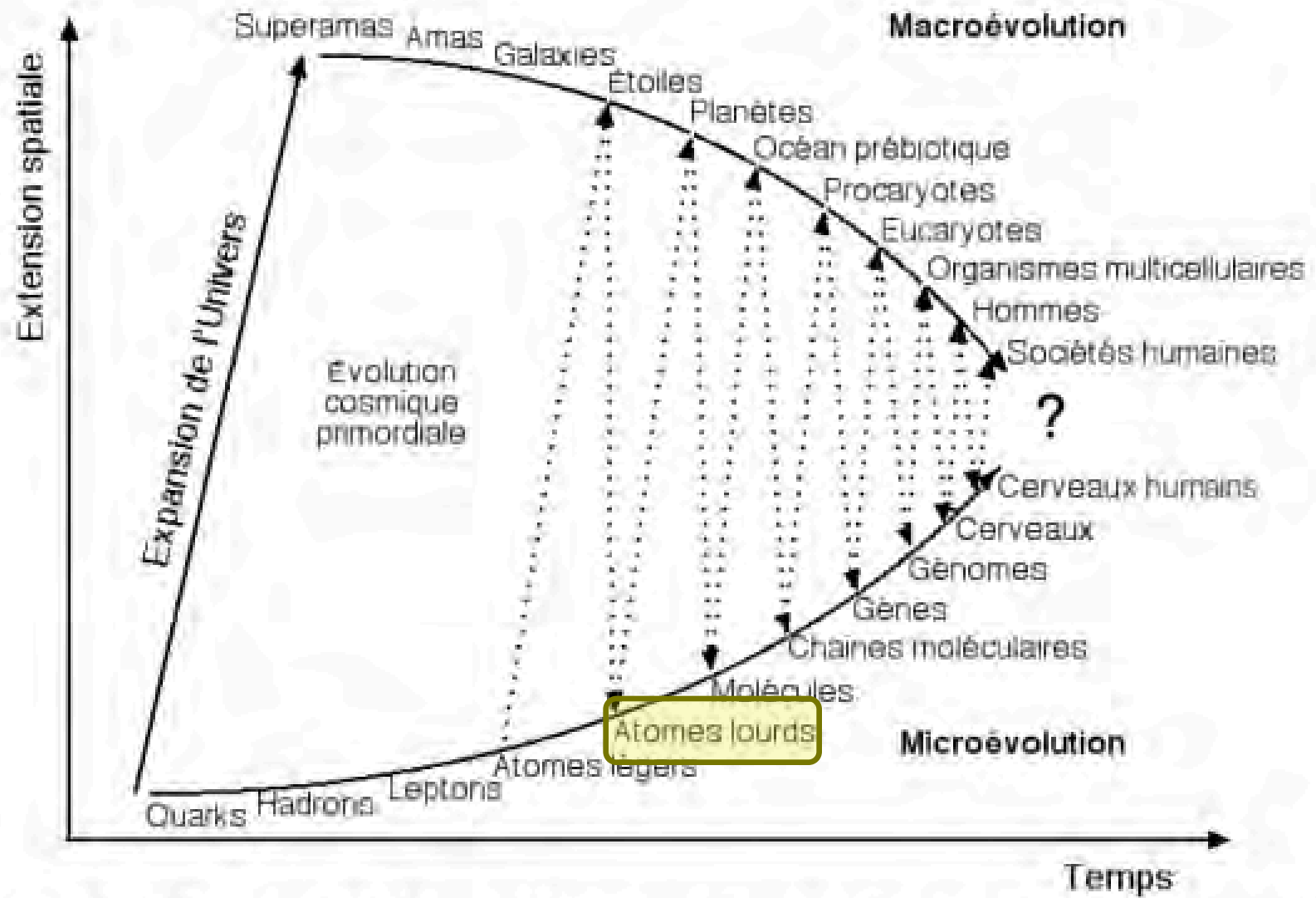
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



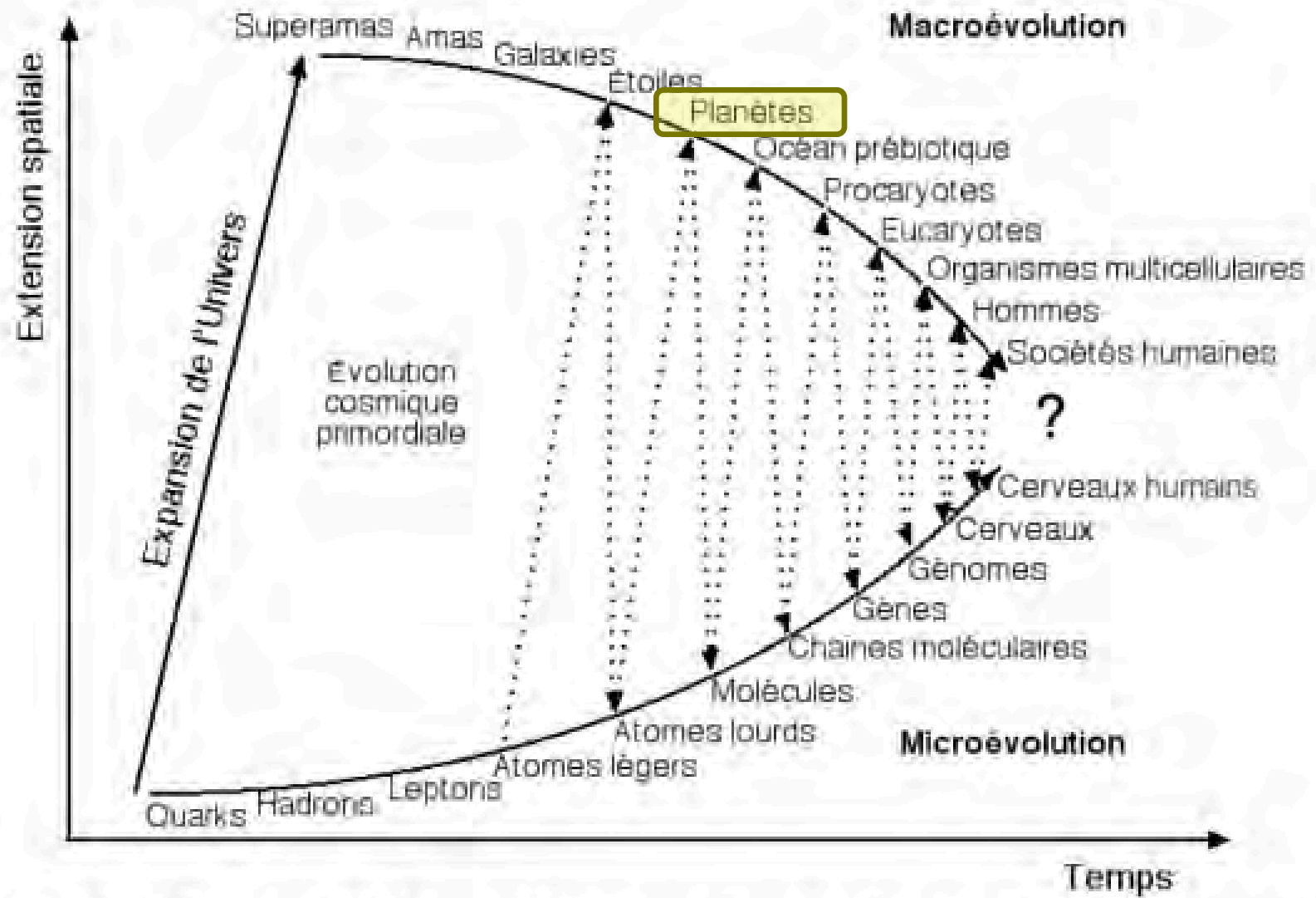
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



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

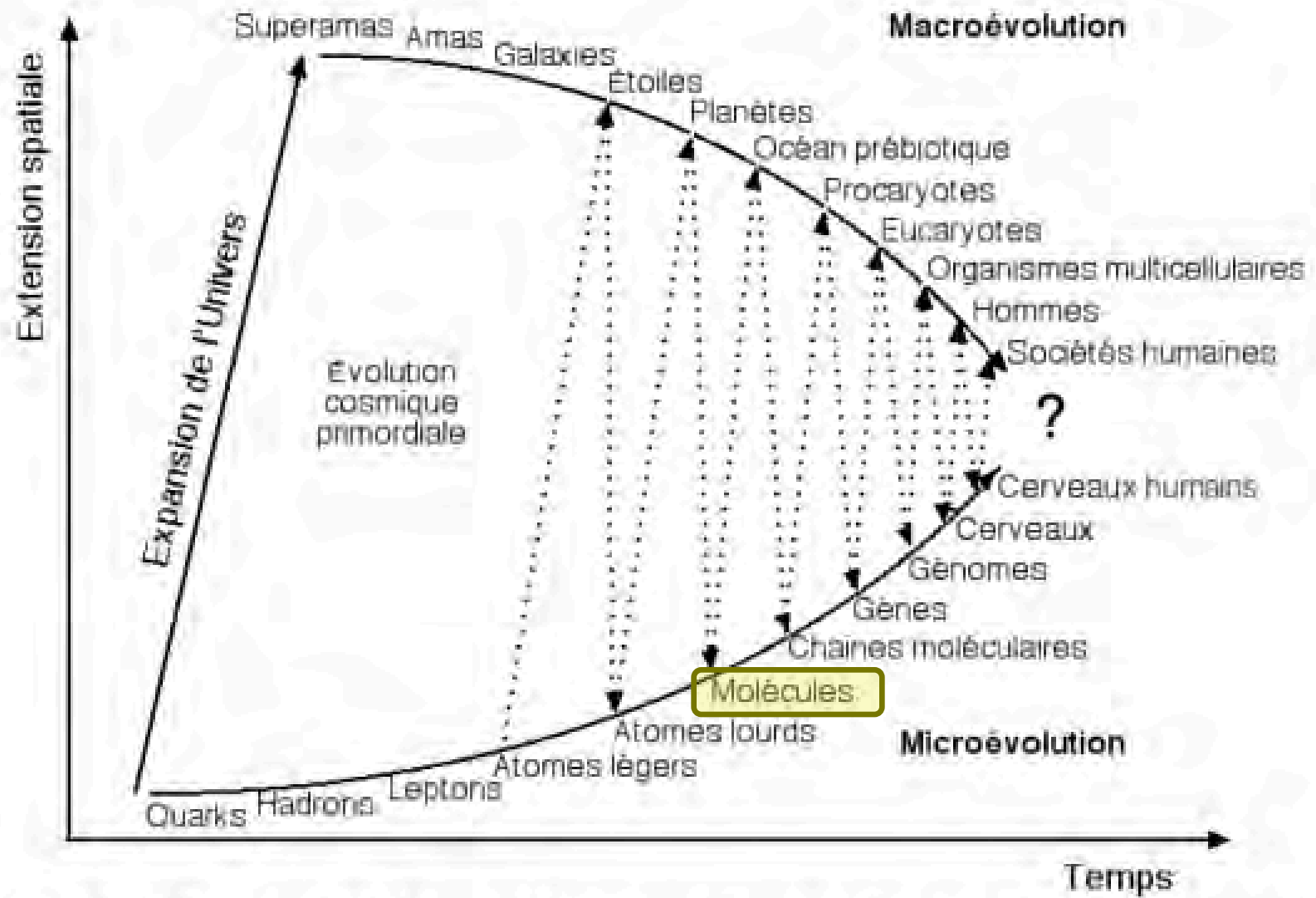


D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.



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

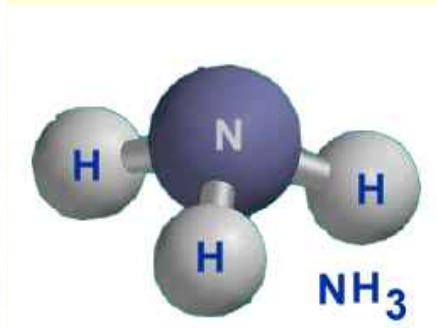
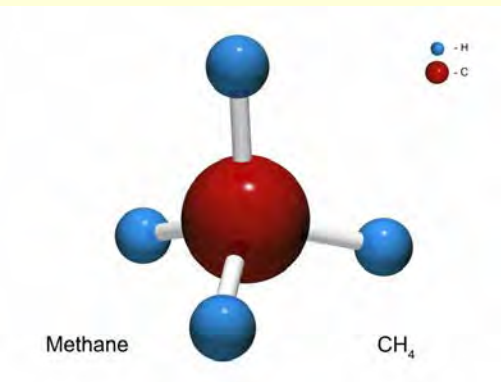




D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

## Molécule :

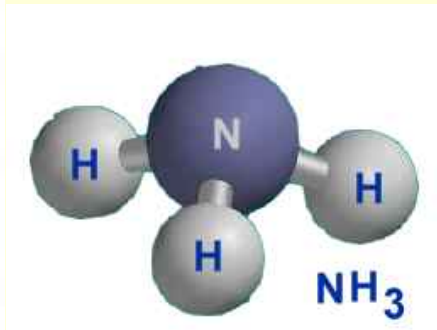
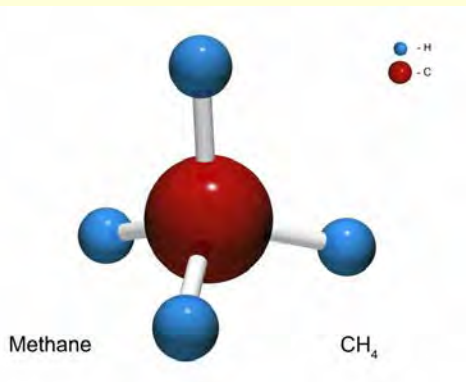
Les molécules constituent des **agrégats atomiques** liés par des liaisons dites « covalentes » d'au moins deux atomes, différents ou non.

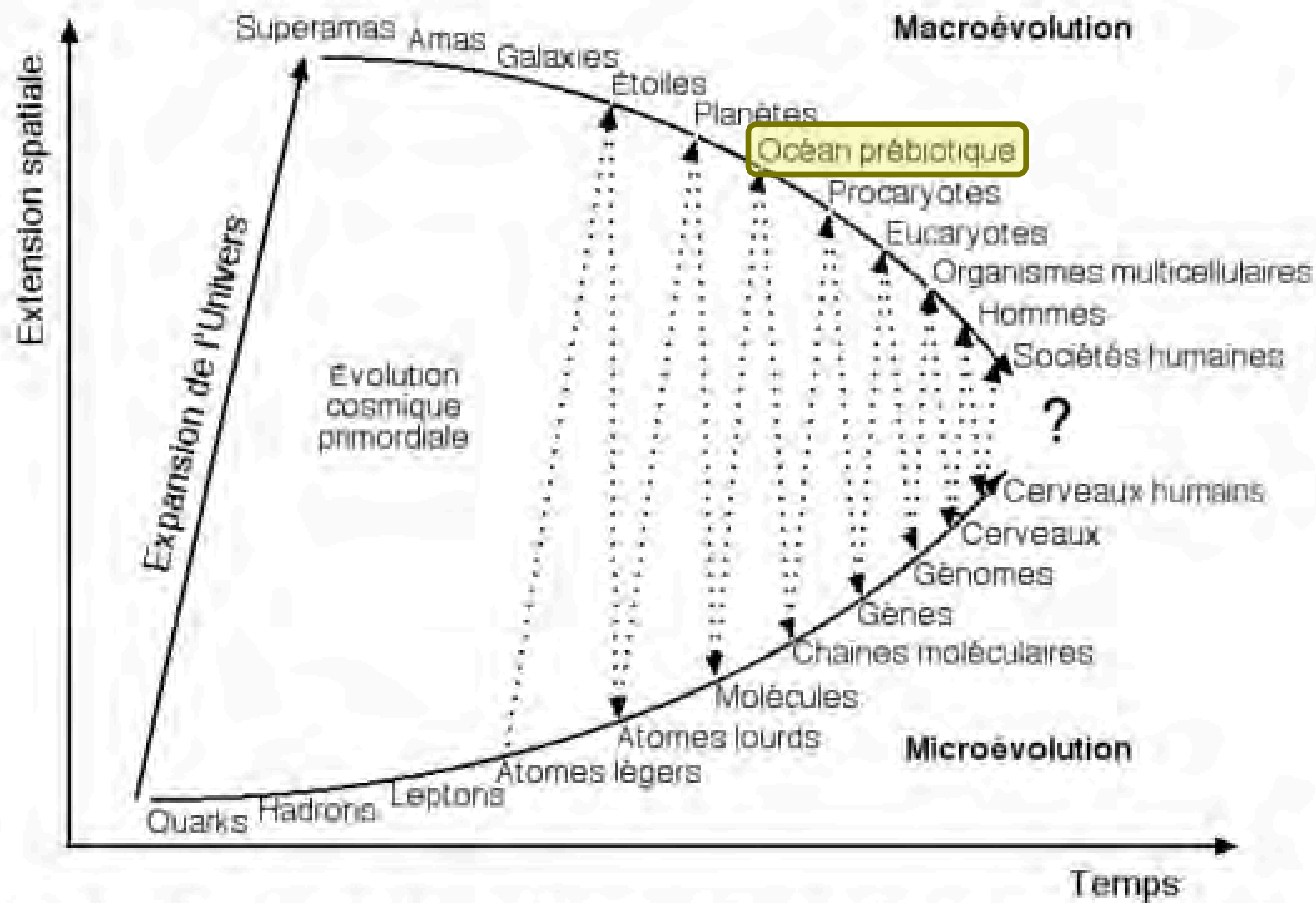


## Molécule :

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

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

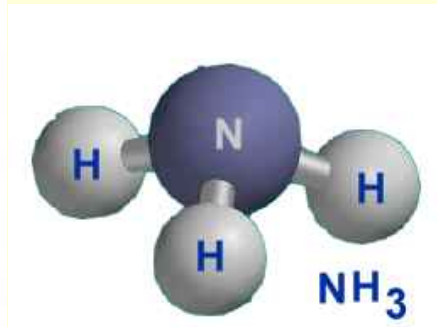
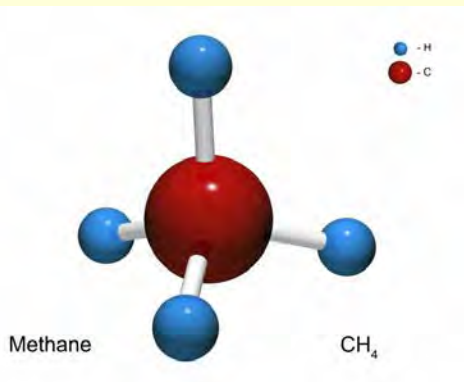
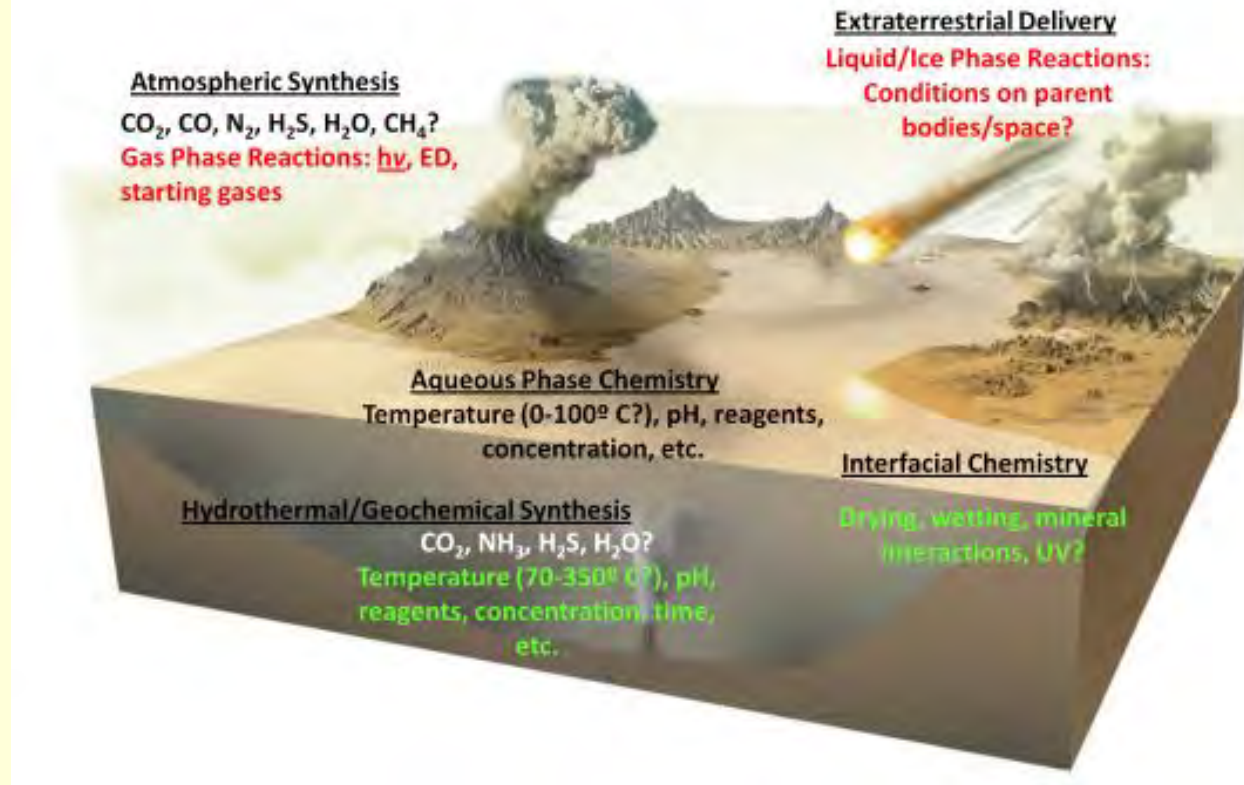




D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

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 ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

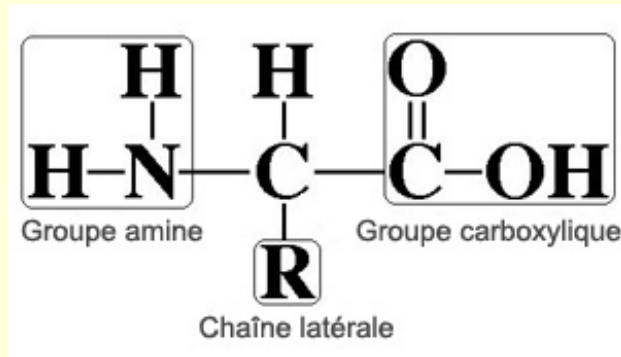


Ces molécules simples ont pu se complexifier jusqu'à un certain point dans les « **mares chaudes** » dont parlait déjà Darwin et qu'on a ensuite appelé « **soupe primitive** ».



atmosphère et " soupe " primitive

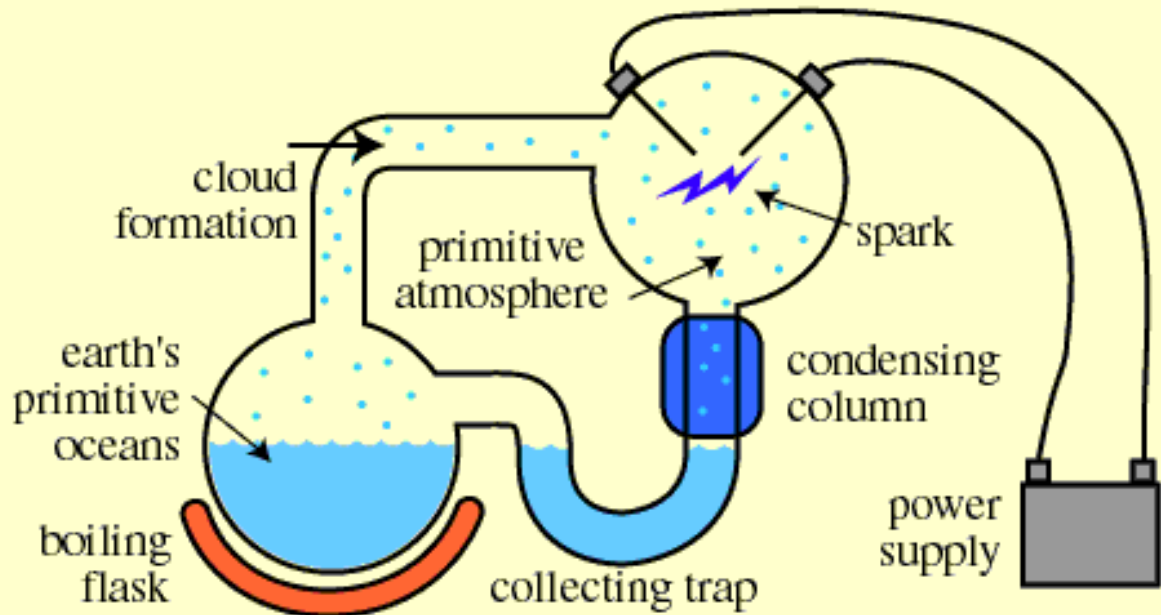
Ces molécules simples ont pu se complexifier jusqu'à un certain point dans les « **mares chaudes** » dont parlait déjà Darwin et qu'on a ensuite appelé « **soupe primitive** ».



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.)

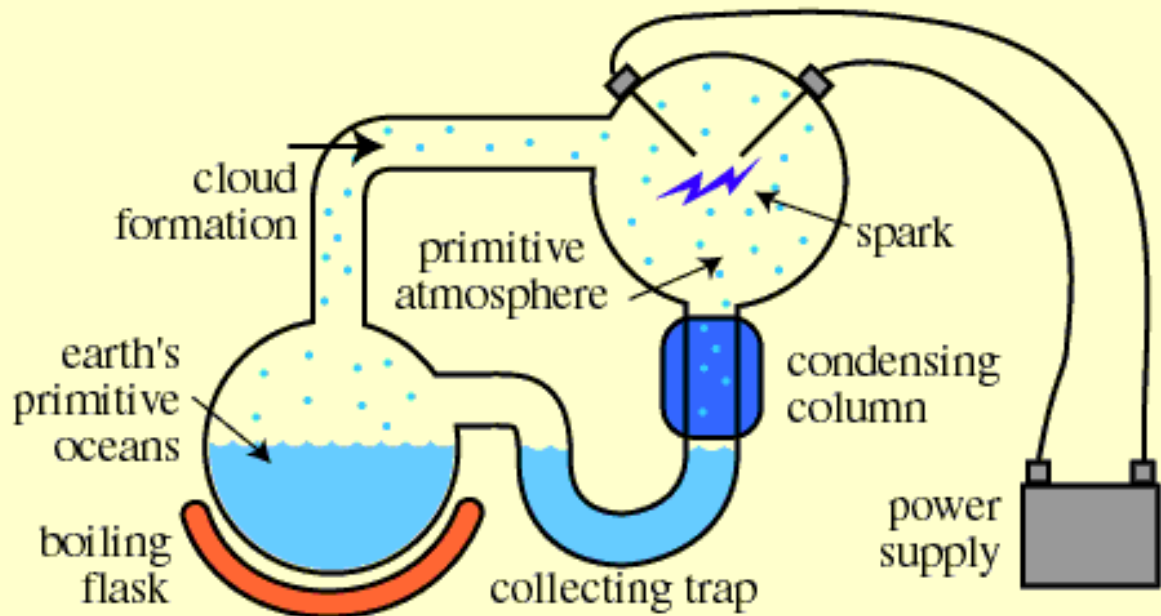


[ Année mémorable pour les sciences de la vie car c'est aussi en **1953** que :

- Watson et Crick découvrent la structure en double-hélice de l'ADN
- Frederick Sanger montre que les protéines sont des séquences linéaires d'acides aminés ]

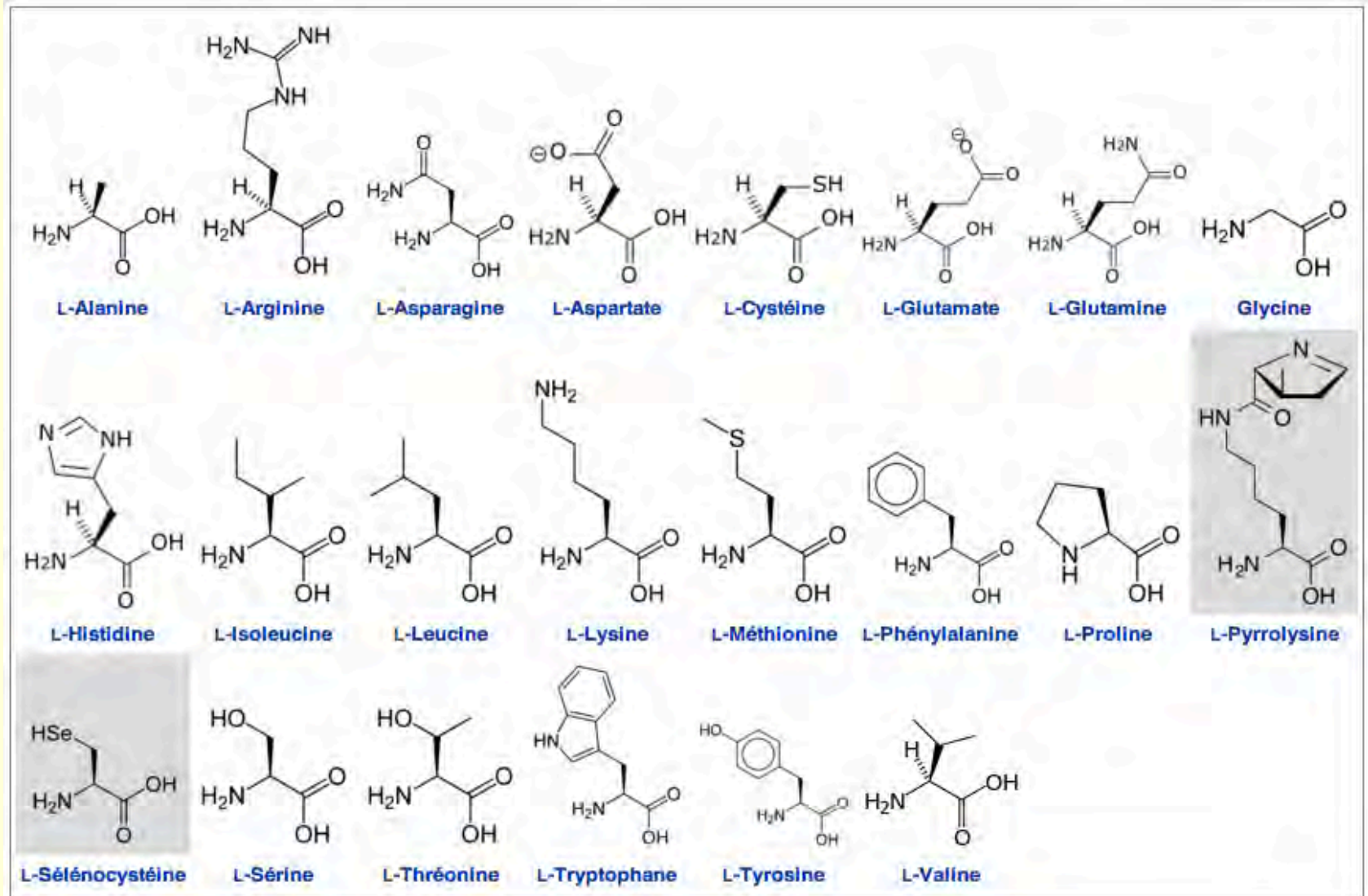
**1953, Miller et Urey :**  
confirment cette hypothèse par une célèbre expérience in vitro où des molécules organiques apparaissent

(**acides aminés**, etc.)





En présence du puissant rayonnement solaire (rayons UV...), ce mélange de gaz aurait donc pu donner naissance à plusieurs **molécules un peu plus complexe** telles que les **acides aminés** (qui formeront plus tard les protéines).

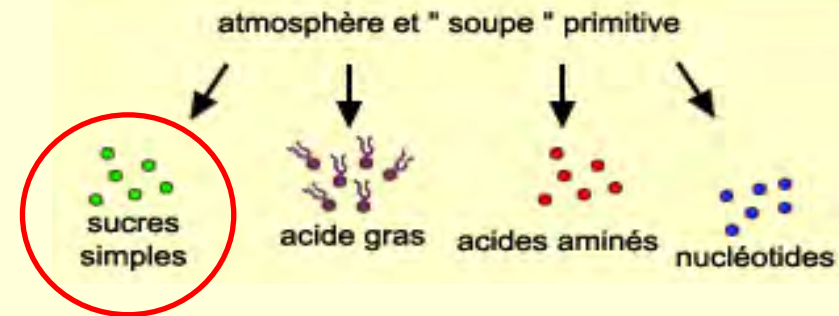


# Un constituant de la vie détecté dans une comète

16 avril 2016 | Pauline Gravel

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

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

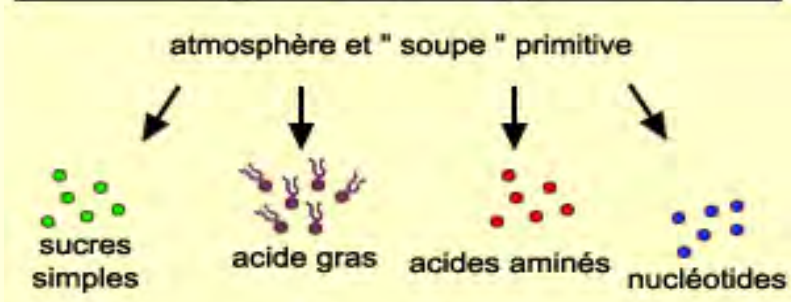


On peut donc dire que le passage de molécules simples vers des molécules organiques comme les acides aminés ou les sucres s'accompagne d'une **croissance de la complexité**.

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

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

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



Un mot sur l'auto-organisation :

**Théorie des systèmes dynamique** (Dynamic System Theory) :

étude des systèmes complexes avec de multiples éléments qui changent au cours du temps.

Prémisse centrale : **auto-organisation**,

i.e. émergence spontanée de patterns cohérents d'ordre supérieur résultant de l'interaction récursive entre les composantes plus simples d'un système dynamique complexe.

(donc une **causalité circulaire** entre différents niveaux du système)

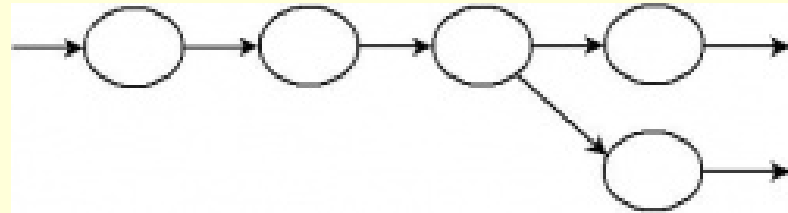
**Evolutionary Systems Theory:  
A Unifying Meta-Theory of Psychological Science**

Paul B. Badcock

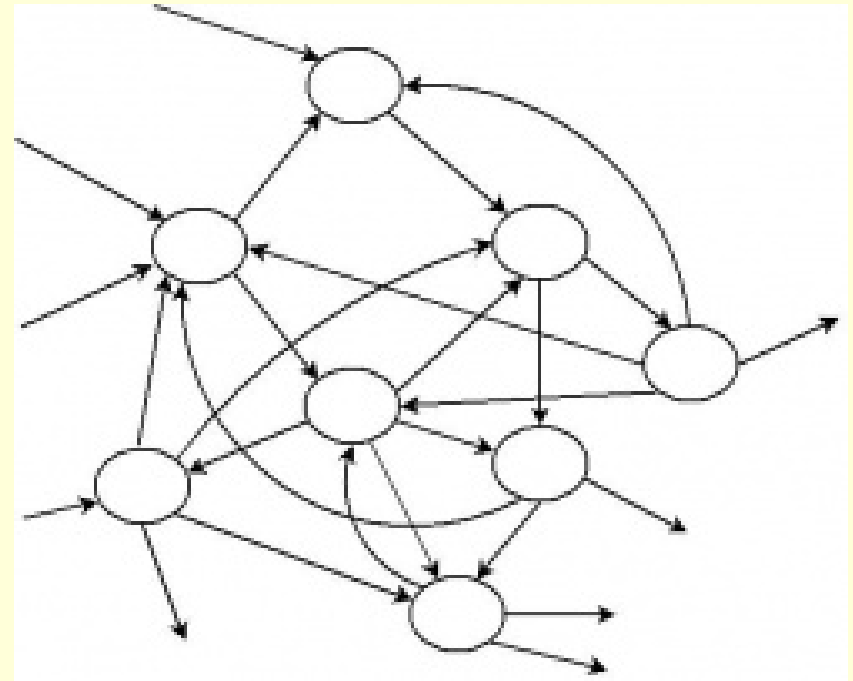
Review of General Psychology, [2012](#), Vol. 16, No. 1, 10–23

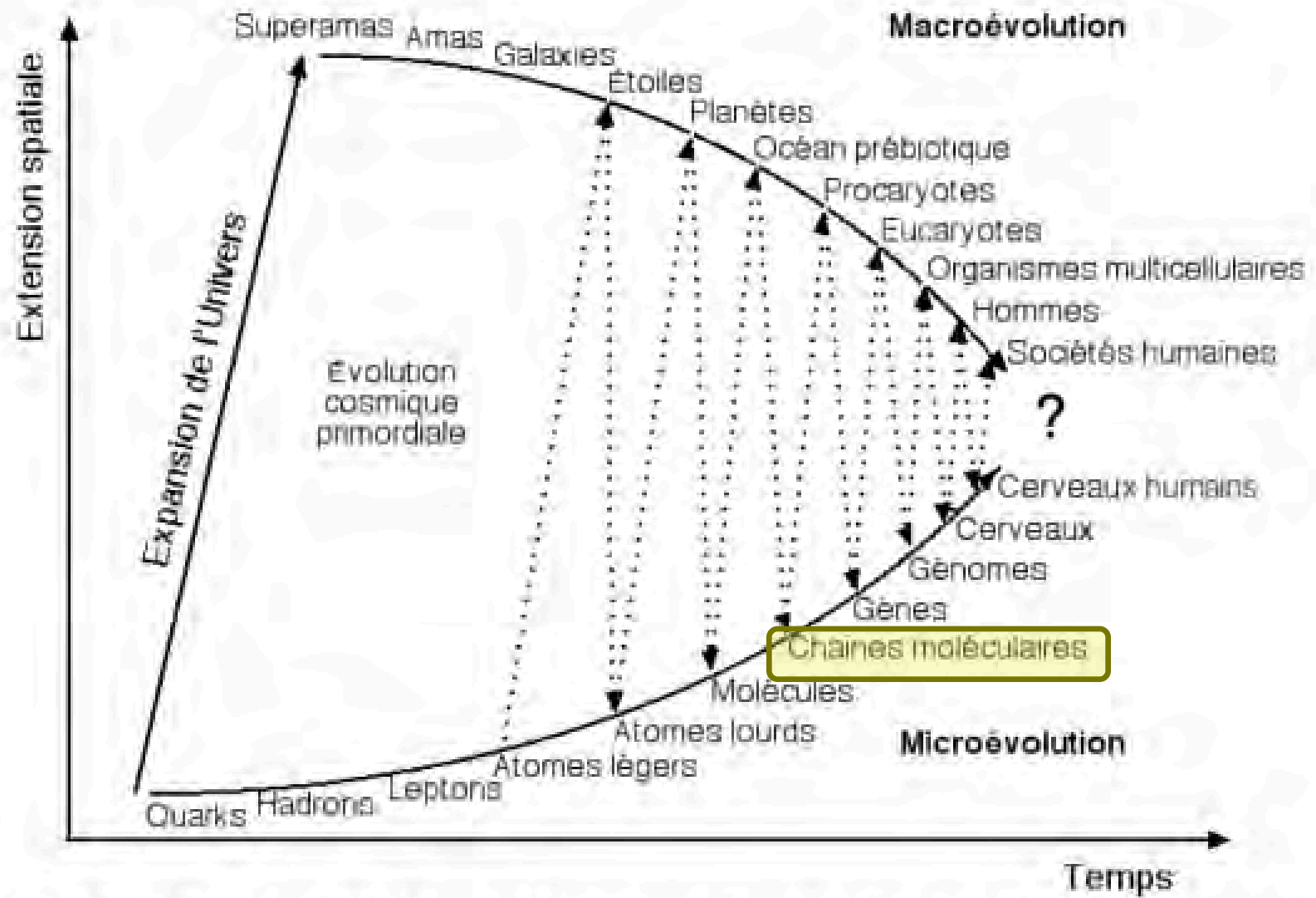


Avec la physique de Newton,  
on est dans un monde de  
causalité **linéaire**.



Mais dans les systèmes dynamiques  
complexes, les connexions entre les  
éléments sont **réciroques** ce qui  
amène une causalité dite “**circulaire**”.

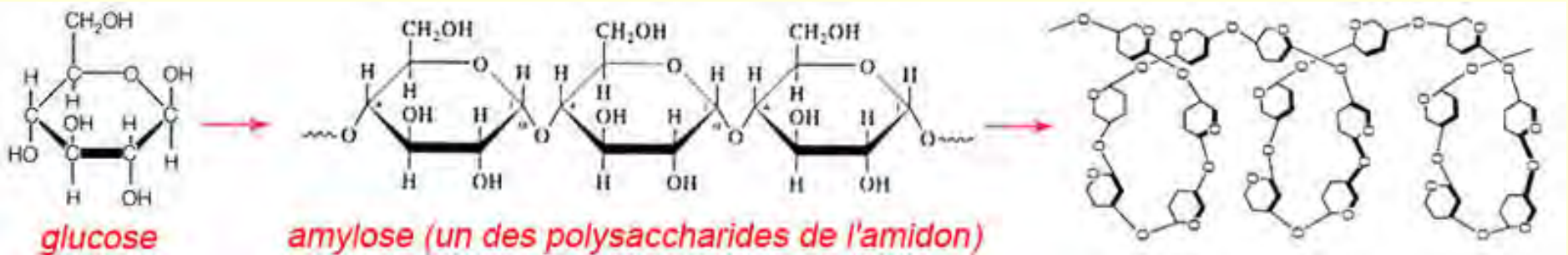




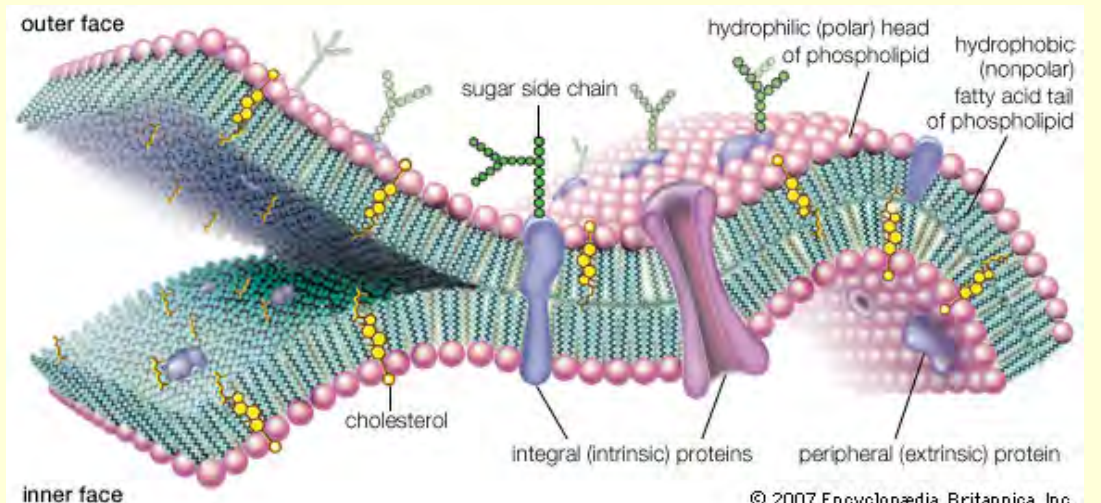
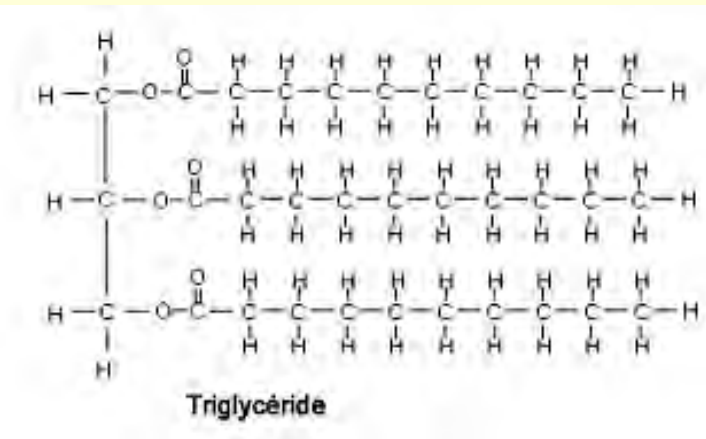
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

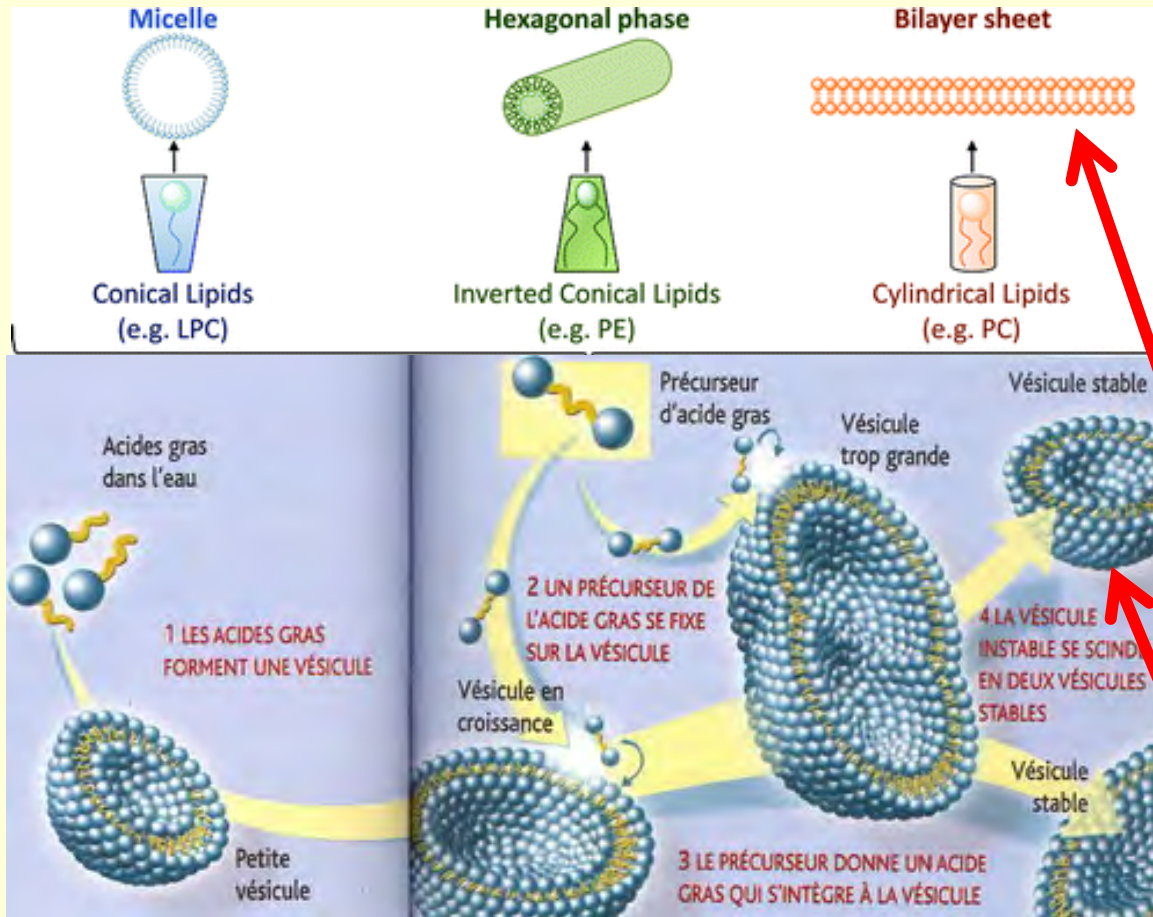
Toujours par auto-organisation, cette évolution chimique va donner lieu à des chaînes moléculaires de :

- Glucides



- Lipides





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

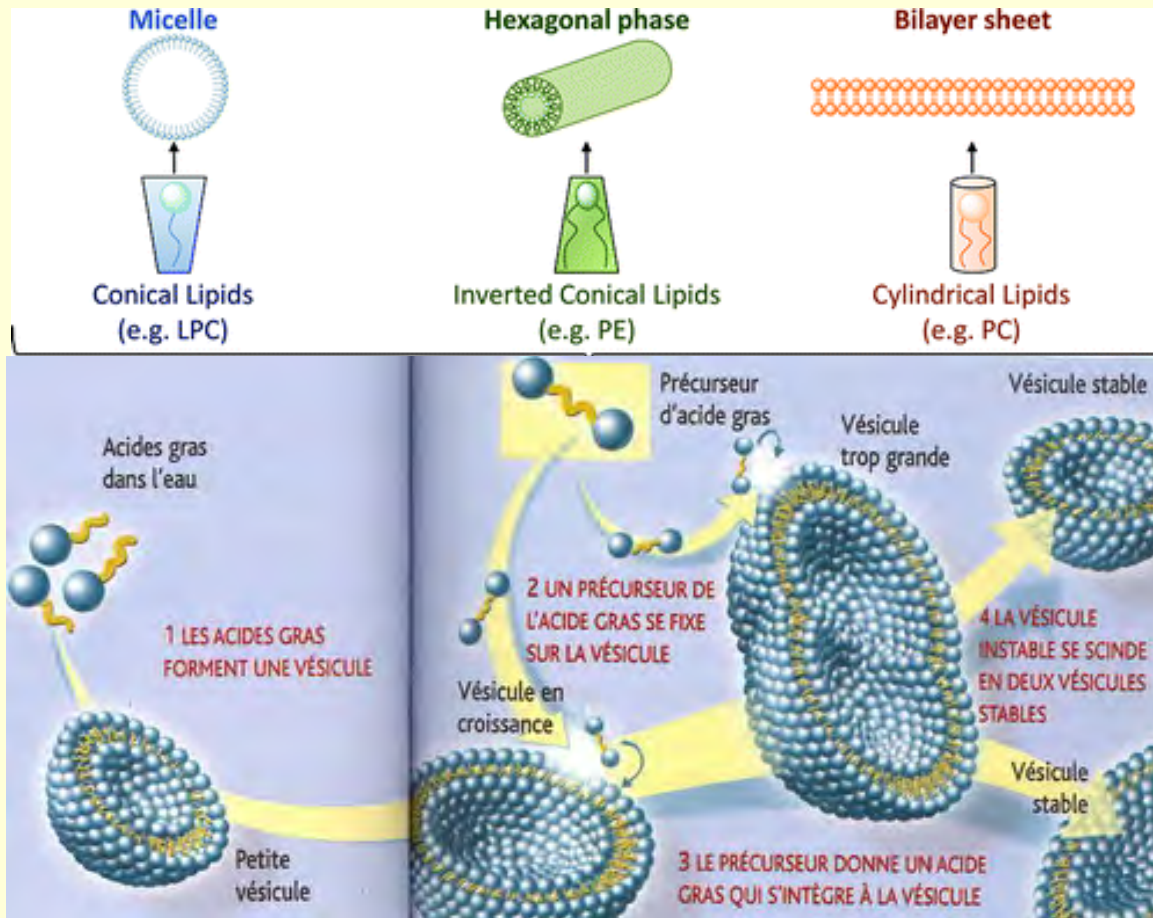
par exemple, des **couches bi-lipidiques**

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

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

- The Systems View of Life





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

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

## Une question se pose ici :

Est-ce que la croissance de la complexité à laquelle on commence à assister et qui va bientôt déboucher sur le vivant était **déterminée** (par des lois physiques) ou découle du **hasard** (d'événements contingents) ?

Vision **déterministe** des choses : l'origine de la vie sur Terre est une conséquence inévitable des conditions physiques et chimiques initiale sur notre planète.

Exemple : Christian de Duve, prix Nobel

Harold Morowitz, auteur de *Beginnings of Cellular Life* (1992), écrit :

“We have no reason to believe that biogenesis was not a series of chemical events subject to all of the laws governing atoms and their interactions. (p. 12)

**We also reject** the suggestions of **Monod** that the origin requires a series of **highly improbable events.**”

À l'opposé, on a une autre école de pensée basée sur la **contingence**, où la vie aurait pu ne jamais se développer ou aurait pu prendre un autre chemin parmi d'innombrables possibilités sans nécessairement arriver à l'être humain.

Stephen Gould, écrit dans son livre *Wonderful Life* :

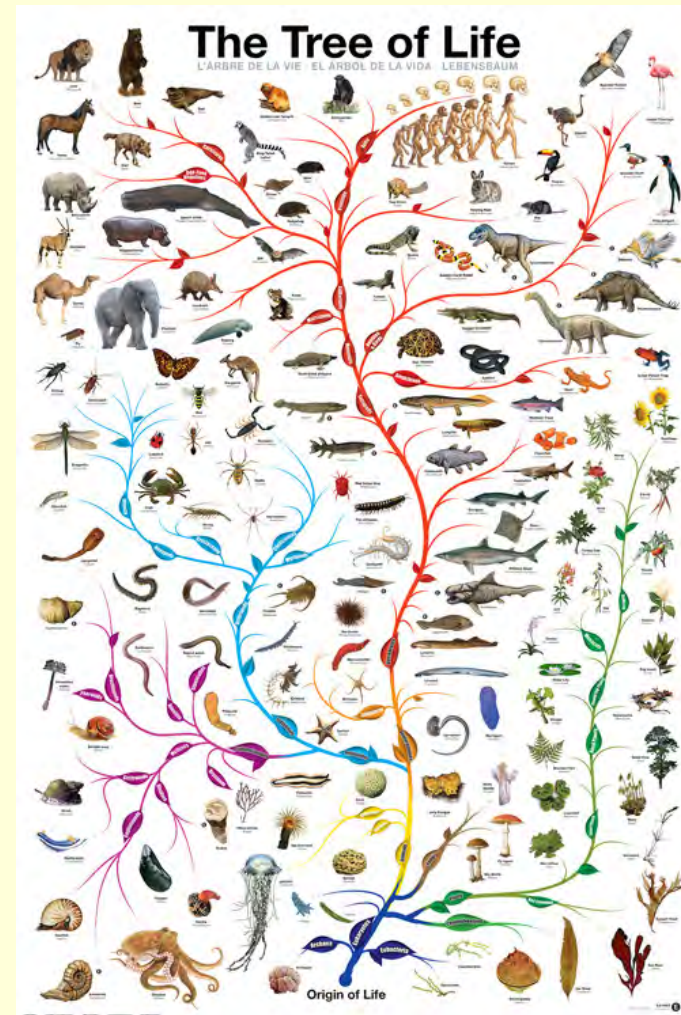
“ . . . the essence of history. Its name is contingency.”

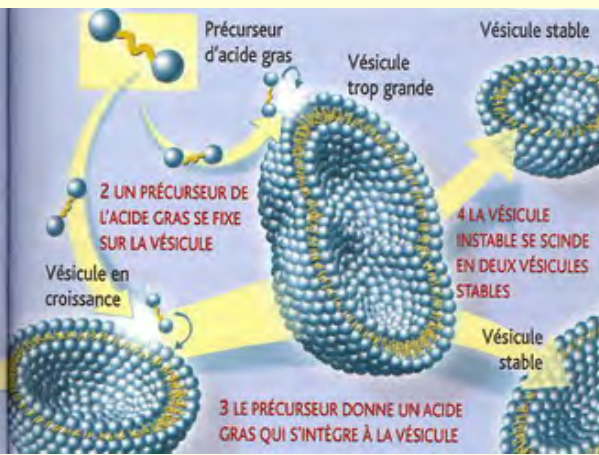
Et il décrit sa célèbre expérience de pensée :

I call this experiment “**replaying life's tape.**”

You press the rewind button and, making sure you thoroughly erase everything that actually happened, go back to any time and place in the past . . . . Then let the tape run again and see if the repetition looks at all like the original (WL, p. 48).

Et sa prédiction était que : “any replay of the tape would lead evolution down a pathway **radically different from the road actually taken**” (WL, p. 51).





Et ça nous ramène aux membranes de ce qui allait devenir les premières cellules...

Car ces membranes n'ont pu se former qu'à cause du **caractère amphiphilique des lipides** ET du fait que les molécules d'eau ont une **polarité électrique**

(les électrons restent plus près de l'atome d'oxygène que des atomes d'hydrogène, ce qui crée une région positive du côté de ces derniers et une régions négative du côté de l'atome d'oxygène).

Sans cette propriété électrique de l'eau, la formation des vésicules, et donc l'émergence de la vie comme on la connaît, n'aurait pas été possible.

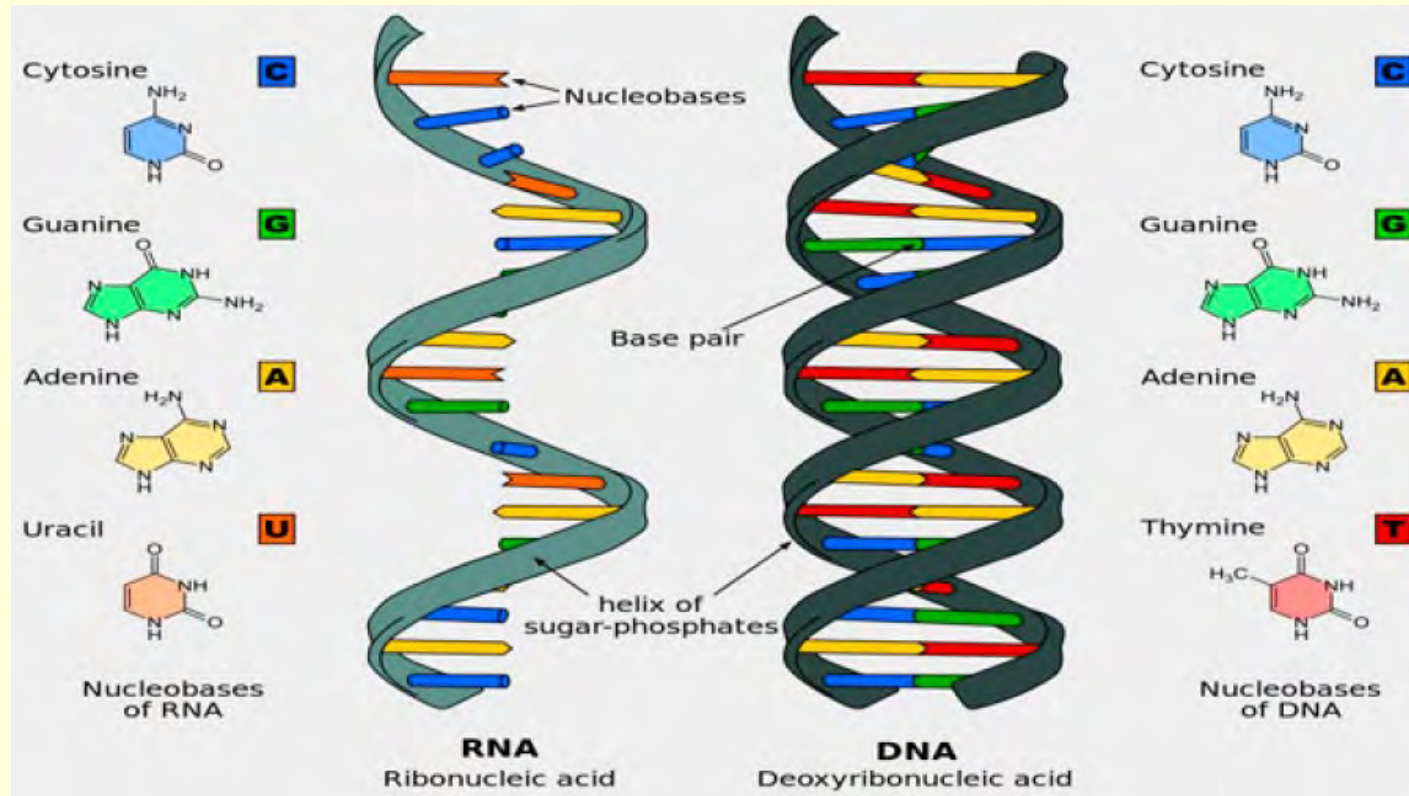
En un sens, on pourrait donc dire que la possibilité de la vie dans l'univers était implicite dès la formation de la molécule d'eau, et même de l'oxygène dans les étoiles et de l'hydrogène peu après le Big Bang !

Donc jusqu'ici, les constituants de base de la vie semblent s'être constitués plutôt en fonction de lois déterministes

Mais les deux (déterminisme et contingence) ne seront peut-être **pas mutuellement exclusives...**

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

- Glucides
- Lipides
- **Bases nucléiques**

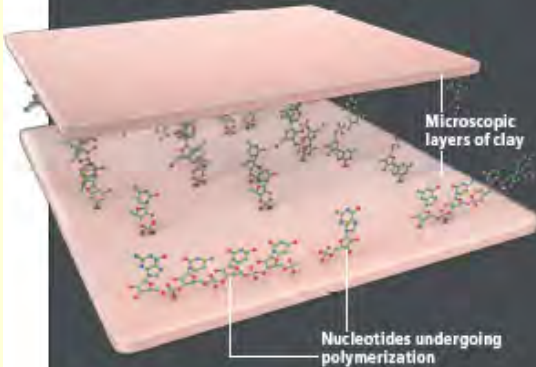


**Même principe d'organisation que pour les lipides:**

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

# ON THE WAY TO LIFE

After chemical reactions created the first genetic building blocks and other organic molecules, geophysical processes brought them to new environments and concentrated them. The chemicals assembled into more complex molecules and then into primitive cells. And some 3.7 billion years ago geophysics may have also nudged these "protocells" to reproduce.



## RNA BREEDING GROUNDS

In the water solutions in which they formed, nucleotides would have had little chance of combining into long strands able to store genetic information. But under the right conditions—for example, if molecular adhesion forces brought them close together between microscopic layers of clay (above)—nucleotides might link up into single strands similar to modern RNA.

Cold side of pond

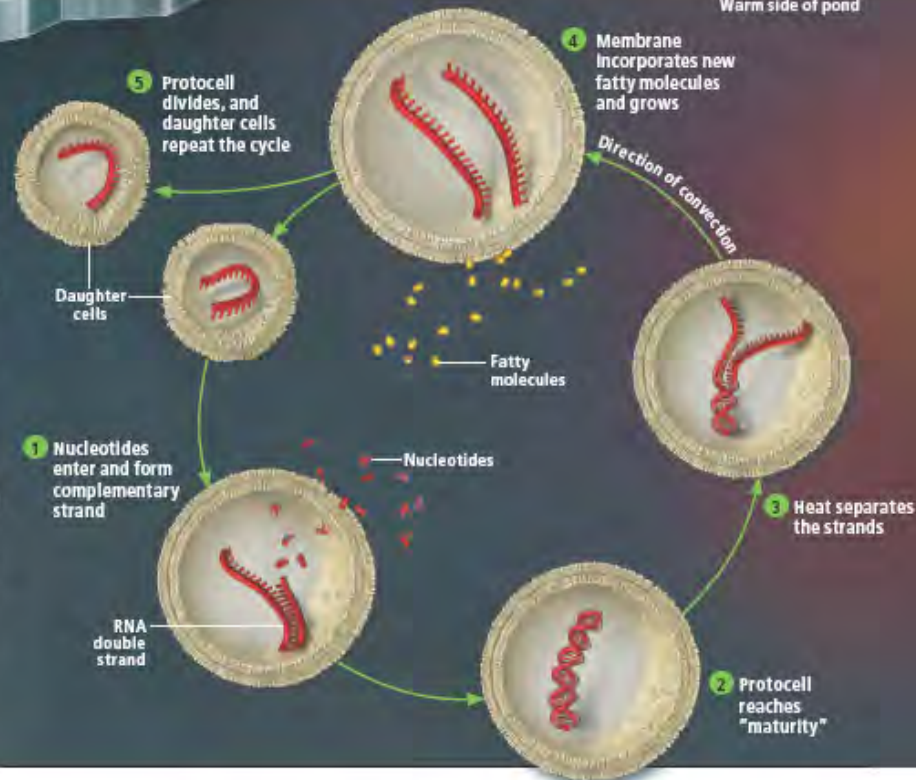
## ASSISTED REPRODUCTION

Once released from clay, the newly formed polymers might become engulfed in water-filled sacs as fatty acids spontaneously arranged themselves into membranes. These protocells probably required some external prodding to begin duplicating their genetic material and thus reproducing. In one possible scenario (right), the protocells circulated between the cold and warm sides of a pond, which may have been partially frozen on one side (the early earth was mostly cold) and thawed on the other side by the heat of a volcano.

On the cold side, single RNA strands acted as templates on which new nucleotides formed base pairs (with As pairing with Us and Cs with Gs), resulting in double strands. On the hot side, heat would break the double strands apart. Membranes could also slowly grow until the protocells divided into "daughter" protocells, which could then start the cycle again.

Once reproduction cycles got going, evolution kicked in—driven by random mutations—and at some point the protocells gained the ability to reproduce on their own. Life was born.

Warm side of pond



## Origin of Life on Earth

Alonso Ricardo and Jack W. Szostak  
 Scientific American 301, 54 - 61 (2009)

## ON THE WAY TO LIFE

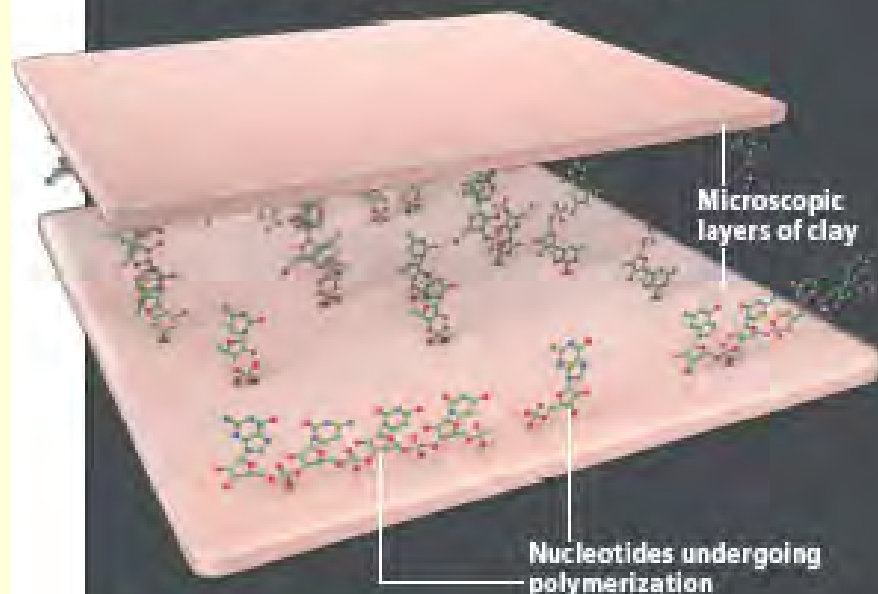
[http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v301/n3/box/scientificamerican0909-54\\_BX2.html](http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v301/n3/box/scientificamerican0909-54_BX2.html)

## [FROM RNA WORLD TO BACTERIA] Journey to the Modern Cell

[http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v301/n3/box/scientificamerican0909-54\\_BX3.html](http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v301/n3/box/scientificamerican0909-54_BX3.html)

# ON THE WAY TO LIFE

After chemical reactions created the first genetic building blocks and other organic molecules, geophysical processes brought them to new environments and concentrated them. The chemicals assembled into more complex molecules and then into primitive cells. And some 3.7 billion years ago geophysics may have also nudged these “protocells” to reproduce.



## RNA BREEDING GROUNDS

In the water solutions in which they formed, nucleotides would have had little chance of combining into long strands able to store genetic information. But under the right conditions—for example, if molecular adhesion forces brought them close together between microscopic layers of clay (*above*)—nucleotides might link up into single strands similar to modern RNA.

Cold side of pond

## ASSISTED REPRODUCTION

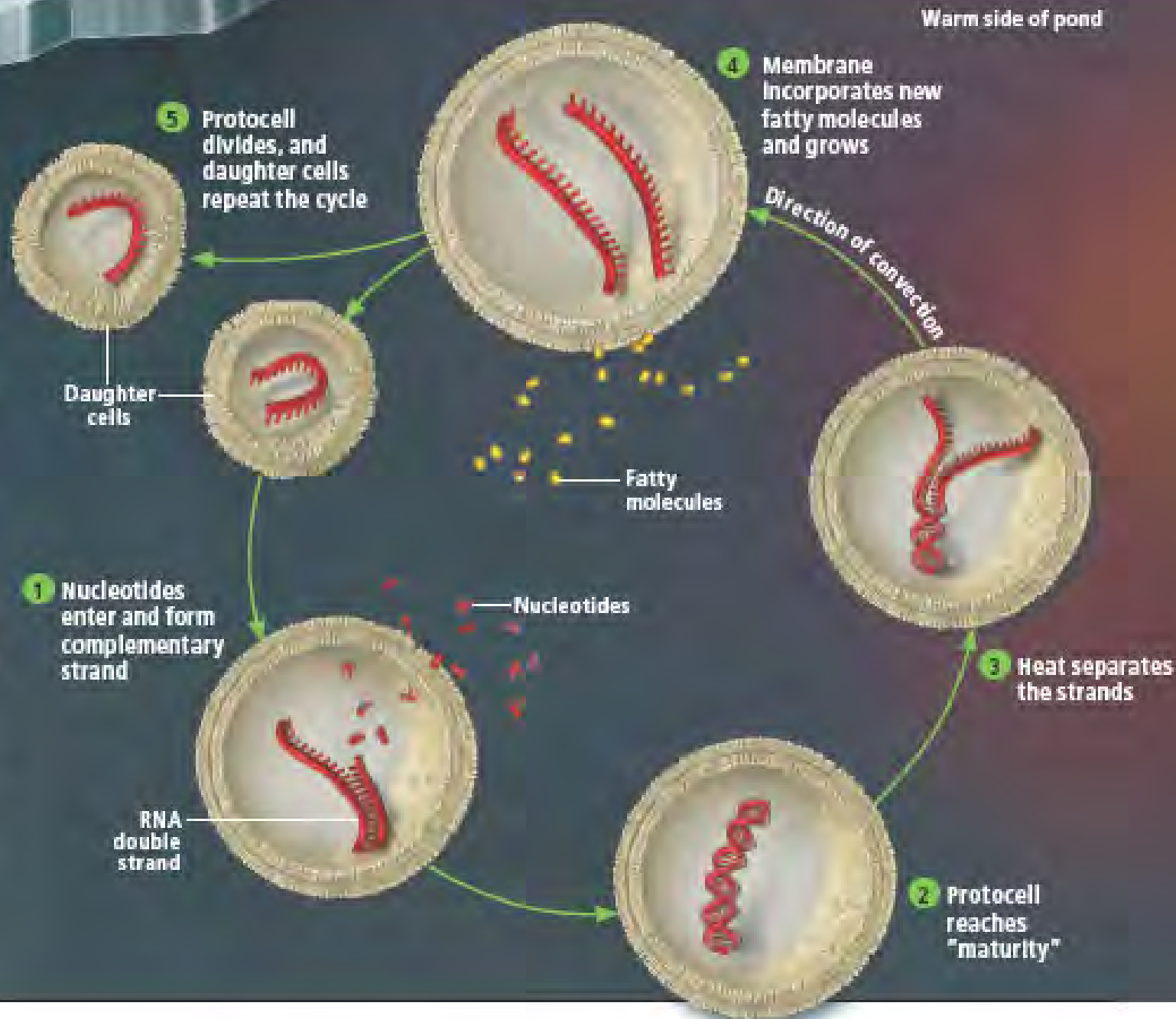
Once released from clay, the newly formed polymers might become engulfed in water-filled sacs as fatty acids spontaneously arranged themselves into membranes. These protocells probably required some external prodding to begin duplicating their genetic material and thus reproducing. In one possible scenario (*right*), the protocells circulated between the cold and warm sides of a pond, which may have been partially frozen on one side (the early earth was mostly cold) and thawed on the other side by the heat of a volcano.

On the cold side, single RNA strands **1** acted as templates on which new nucleotides formed base pairs (with As pairing with Us and Cs with Gs), resulting in double strands **2**. On the hot side, heat would break the double strands apart **3**. Membranes could also slowly grow **4** until the protocells divided into “daughter” protocells **5**, which could then start the cycle again.

Once reproduction cycles got going, evolution kicked in—driven by random mutations—and at some point the protocells gained the ability to reproduce on their own. Life was born.

### REPRODUCTION

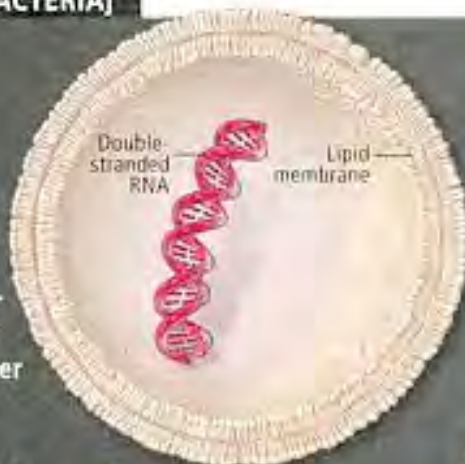
From clay, the newly formed molecules might become engulfed by membranes as fatty acids spontaneously formed themselves into membranes. Protocells probably required external prodding to begin their genetic material and metabolism. In one possible scenario, protocells circulated between cold and warm sides of a pond. They may have been partially frozen on the cold side (the early earth was thought to have frozen on the other side of a volcano). On the warm side, single RNA strands could have formed on clay plates on which new molecules formed base pairs (with As and Cs with Gs), resulting in double strands. On the hot side, the double strands could break the double strands apart. Membranes could also slowly divide. Protocells divided into daughter cells, which could repeat the cycle again. As the reproduction cycles got going, the protocells could have eventually gained the ability to make their own membranes. Life was born.





# Journey to the Modern Cell

After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible sequence of some of the major events that led from the first protocell to DNA-based cells such as bacteria.

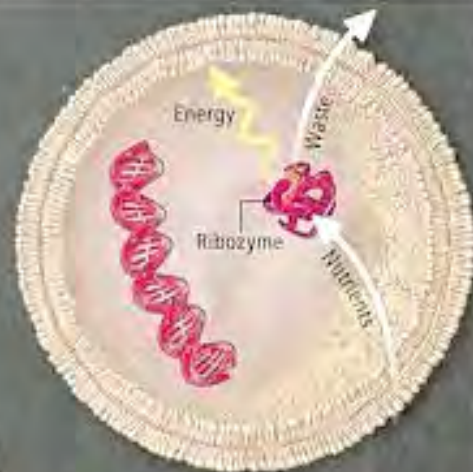


## 1 EVOLUTION STARTS ▲

The first protocell is just a sac of water and RNA and requires an external stimulus (such as cycles of heat and cold) to reproduce. But it will soon acquire new traits.

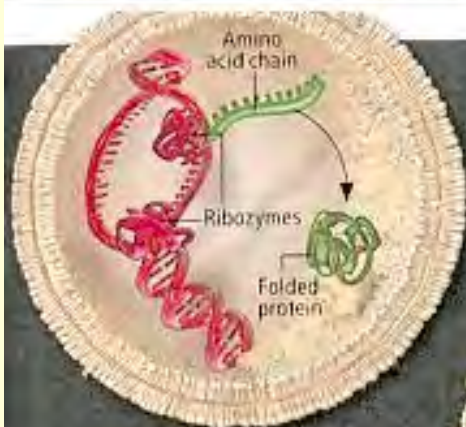
## 2 RNA CATALYSTS ▼

Ribozymes—folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes—arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.



## 3 METABOLISM BEGINS ▲

Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.

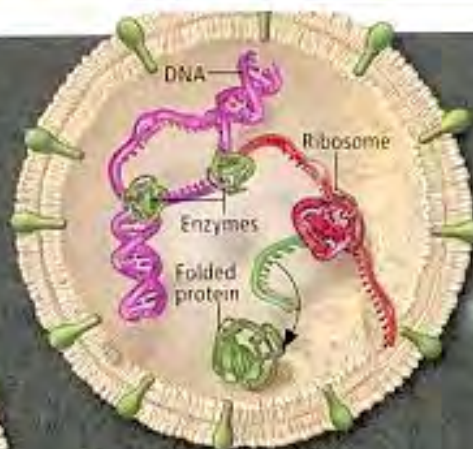
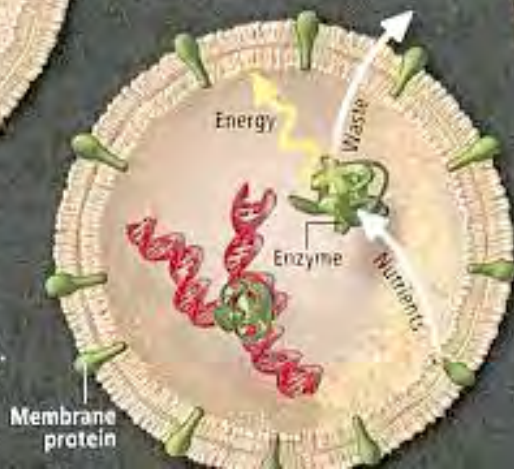


## 4 PROTEINS APPEAR ▲

Complex systems of RNA catalysts begin to translate strings of RNA letters (genes) into chains of amino acids (proteins). Proteins later prove to be more efficient catalysts and able to carry out a variety of tasks.

## 5 PROTEINS TAKE OVER ▼

Proteins take on a wide range of tasks within the cell. Protein-based catalysts, or enzymes, gradually replace most ribozymes.



## 6 THE BIRTH OF DNA ▲

Other enzymes begin to make DNA. Thanks to its superior stability, DNA takes on the role of primary genetic molecule. RNA's main role is now to act as a bridge between DNA and proteins.

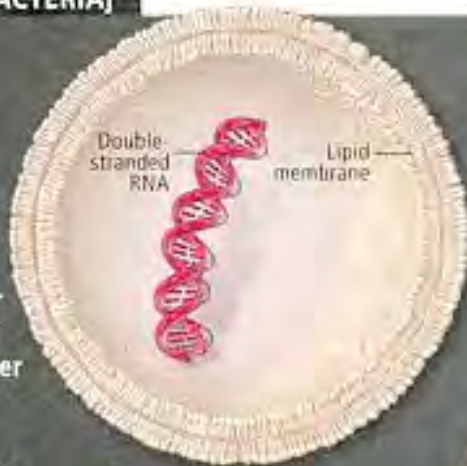
## 7 BACTERIAL WORLD ▲

Organisms resembling modern bacteria adapt to living virtually everywhere on earth and rule unopposed for billions of years, until some of them begin to evolve into more complex organisms.



# Journey to the Modern Cell

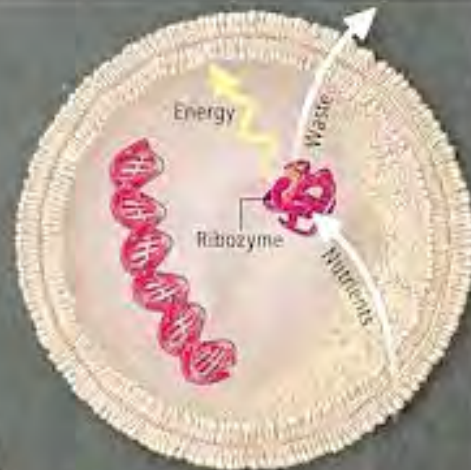
After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible



## 1 EVOLUTION STARTS ▲

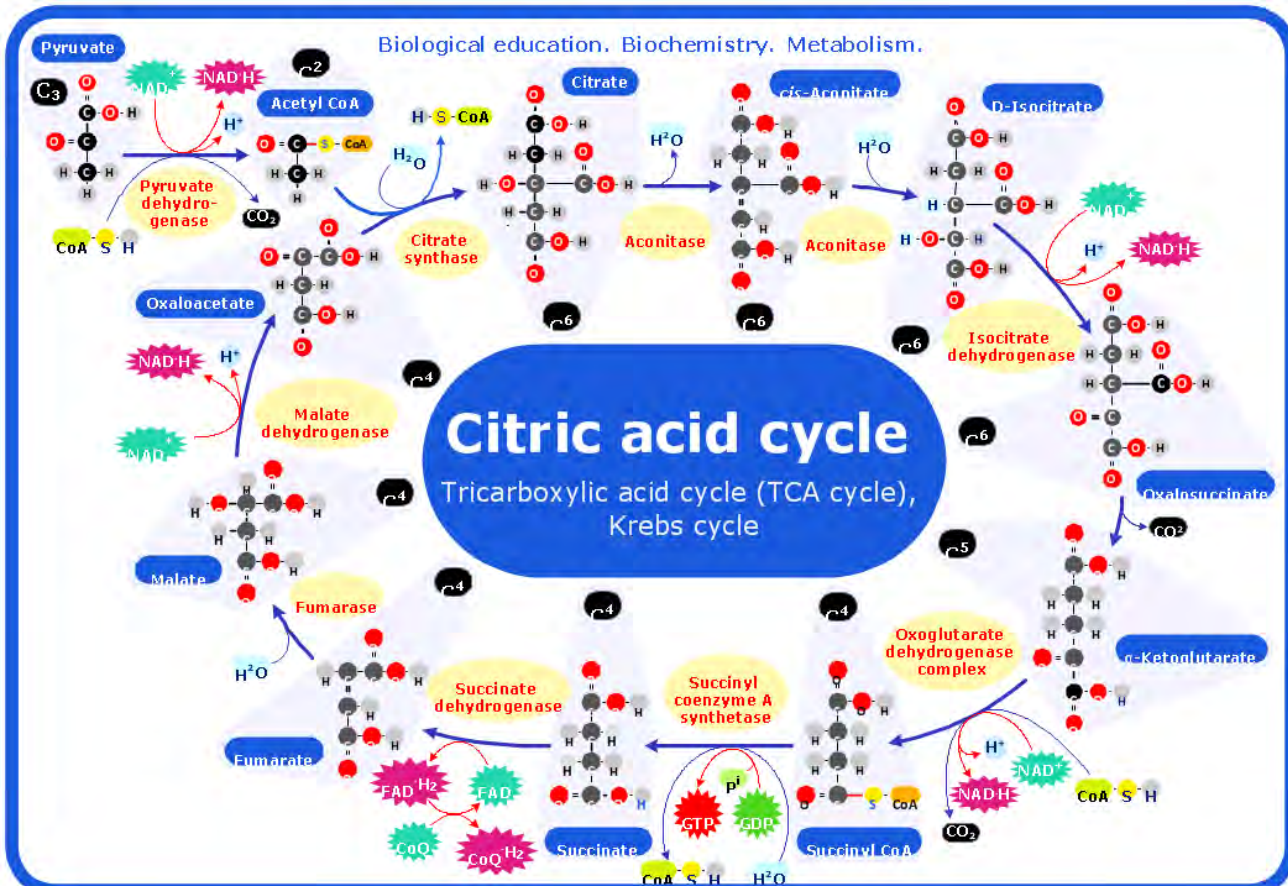
## 2 RNA CATALYSTS ▼

Ribozymes—folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes—arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.



## 3 METABOLISM BEGINS ▲

Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.

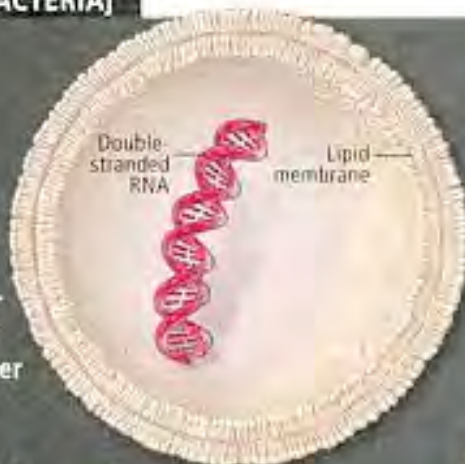


## 7 BACTERIAL WORLD ▲

Organisms resembling modern bacteria adapt to living virtually everywhere on earth and rule unopposed for billions of years, until some of them begin to evolve into more complex organisms.

# Journey to the Modern Cell

After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible sequence of some of the major events that led from the first protocell to DNA-based cells such as bacteria.

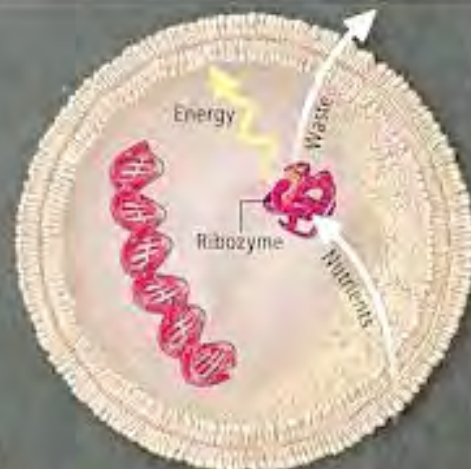


## 1 EVOLUTION STARTS ▲

The first protocell is just a sac of water and RNA and requires an external stimulus (such as cycles of heat and cold) to reproduce. But it will soon acquire new traits.

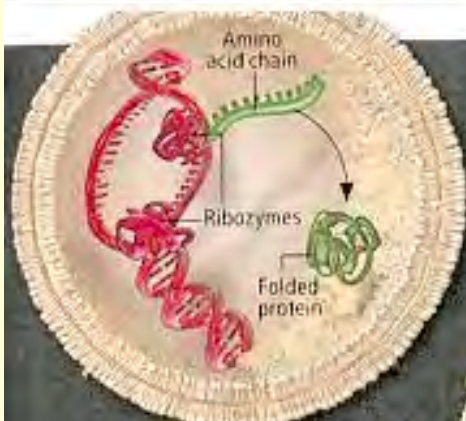
## 2 RNA CATALYSTS ▼

Ribozymes—folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes—arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.



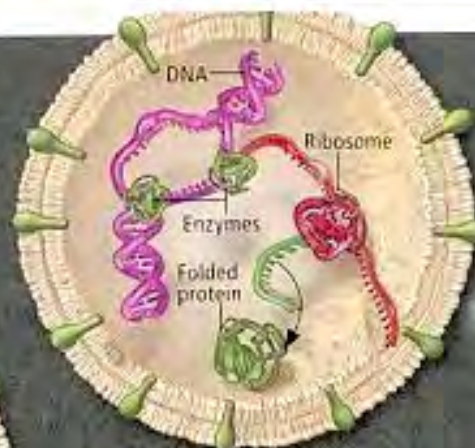
## 3 METABOLISM BEGINS ▲

Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.



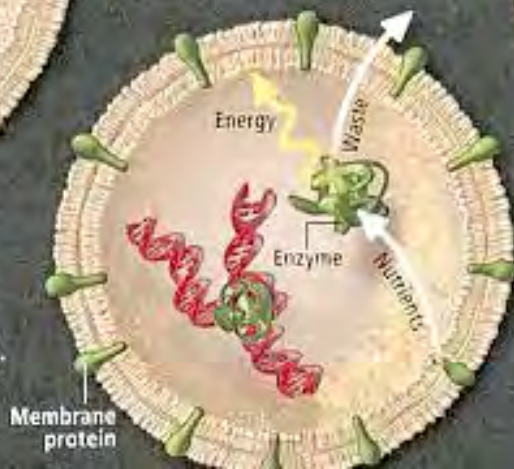
## 5 PROTEINS TAKE OVER ▼

Proteins take on a wide range of tasks within the cell. Protein-based catalysts, or enzymes, gradually replace most ribozymes.



## 4 PROTEINS APPEAR ▲

Complex systems of RNA catalysts begin to translate strings of RNA letters (genes) into chains of amino acids (proteins). Proteins later prove to be more efficient catalysts and able to carry out a variety of tasks.



## 6 THE BIRTH OF DNA ▲

Other enzymes begin to make DNA. Thanks to its superior stability, DNA takes on the role of primary genetic molecule. RNA's main role is now to act as a bridge between DNA and proteins.

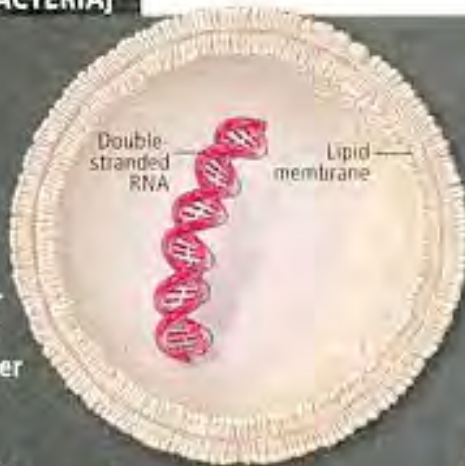
## 7 BACTERIAL WORLD ▲

Organisms resembling modern bacteria adapt to living virtually everywhere on earth and rule unopposed for billions of years, until some of them begin to evolve into more complex organisms.



# Journey to the Modern Cell

After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible sequence of some of the major events that led from the first protocell to DNA-based cells such as bacteria.

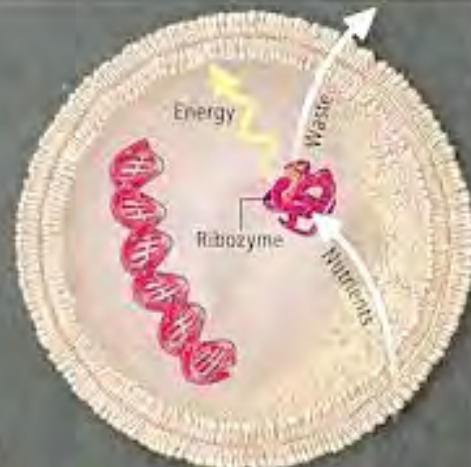


## 1 EVOLUTION STARTS ▲

The first protocell is just a sac of water and RNA and requires an external stimulus (such as cycles of heat and cold) to reproduce. But it will soon acquire new traits.

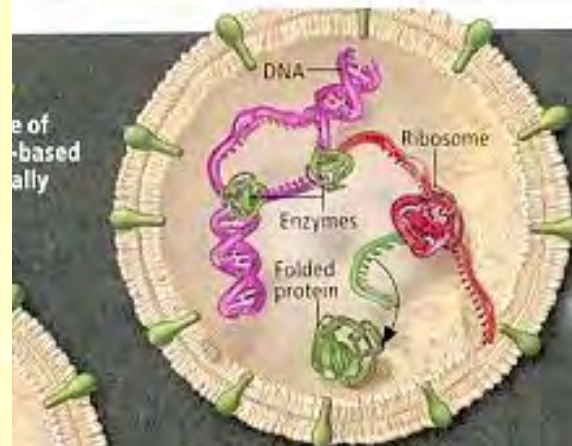
## 2 RNA CATALYSTS ▼

Ribozymes—folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes—arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.



## 3 METABOLISM BEGINS ▲

Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.



## 6 THE BIRTH OF DNA ▲

Other enzymes begin to make DNA. Thanks to its superior stability, DNA takes on the role of primary genetic molecule. RNA's main role is now to act as a bridge between DNA and proteins.

## 7 BACTERIAL WORLD ▲

Organisms resembling modern bacteria adapt to living virtually everywhere on earth and rule unopposed for billions of years, until some of them begin to evolve into more complex organisms.

Gènes

nécessaire pour réparer, répliquer et transcrire les gènes

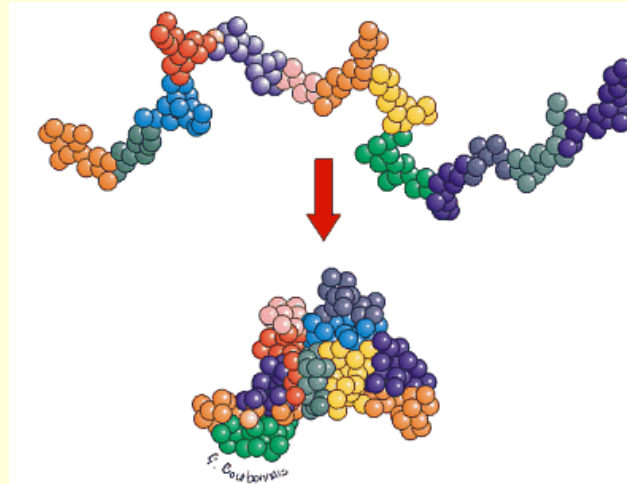
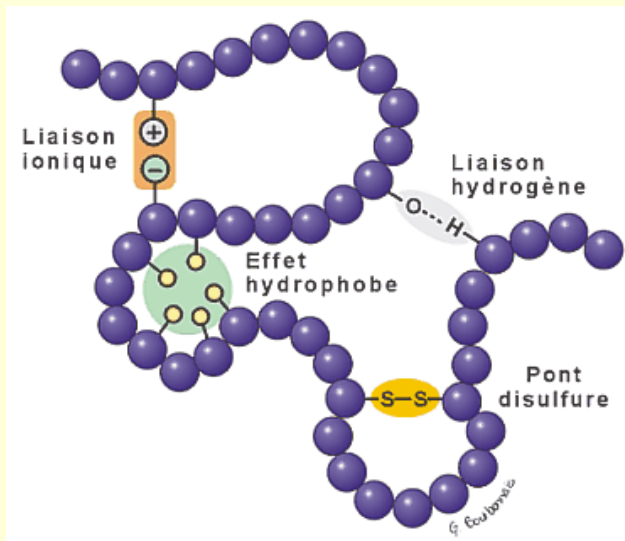
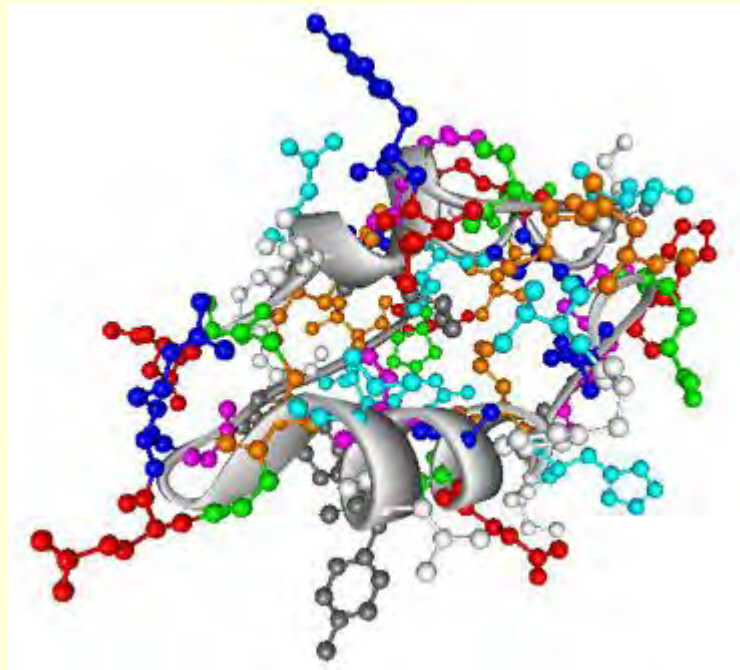
nécessaire pour fabriquer les enzymes

Métabolisme

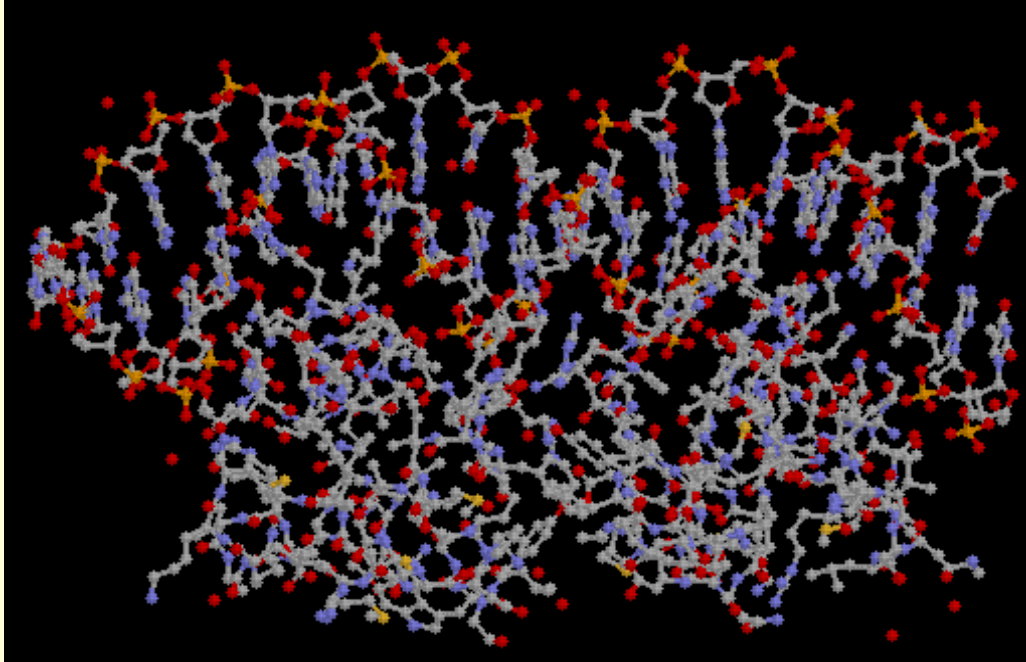
of DNA-based cells

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

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



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



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

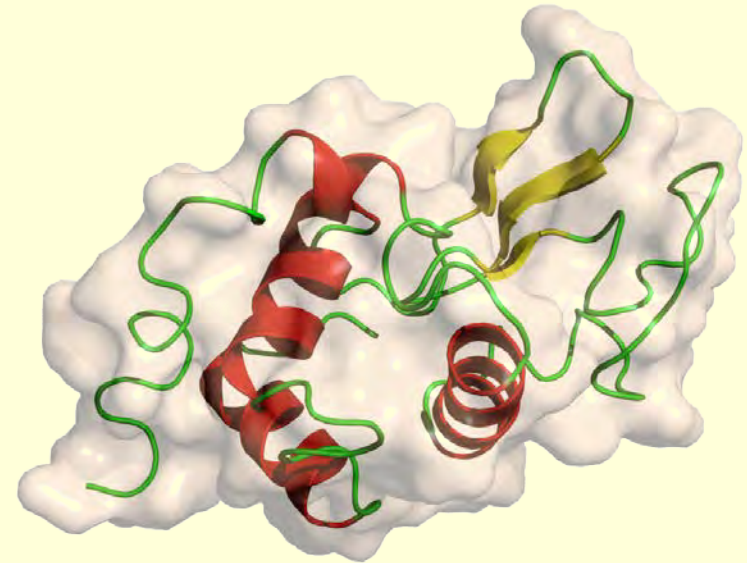
Et Chris Anfinsen a démontré en **1954** que ce repliement spontané à partir de la structure primaire de la protéine est aussi **le plus stable thermodynamiquement**.

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

Exemple tiré de *The System Views of Life*, de Fritjof Capra et Pier Luigi Luisi.

L'enzyme **lysozyme** possède 129 acides aminés dans un ordre bien précis (chaque position peut être occupée par 20 acides aminés différents).

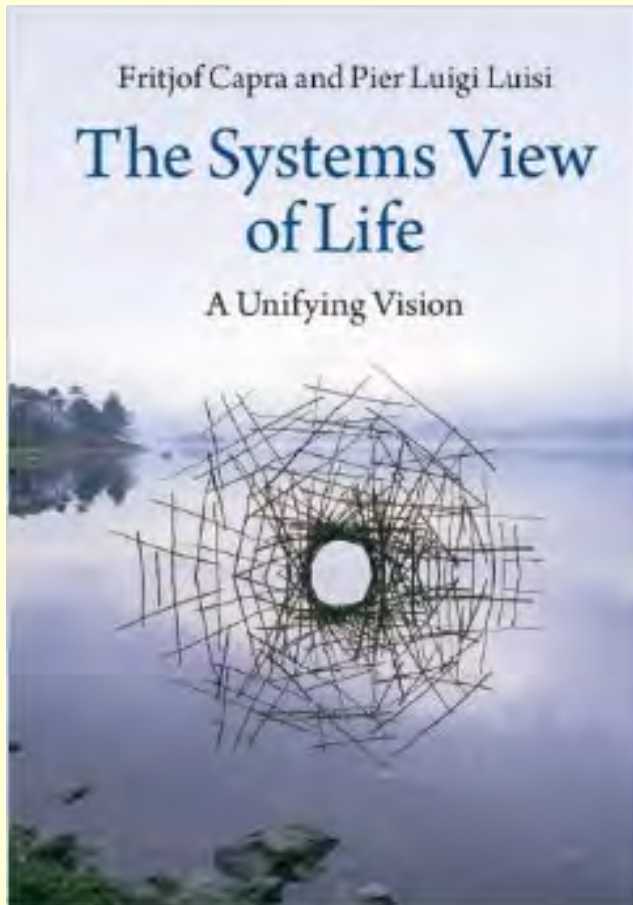
Or on peut se demander combien la nature avait-elle de possibilité d'ordonner dans cet ordre les 129 acides aminés du lysozyme.



La réponse est  $20^{129}$ , ou encore  $10^{168}$ , c'est-à-dire **10 suivi de 168 zéros !**

Et le lysozyme, qui a une fonction bien précise dans l'organisme, est l'une de ces possibilités qu'il est donc plus facile d'envisager comme le résultat du **hasard** des combinatoires.

Ce n'est pas le genre de débat qui est tranché par la science, mais disons que ça résonne bien avec le bouquin de Jacques Monod, ***Le hasard et la nécessité...***



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...

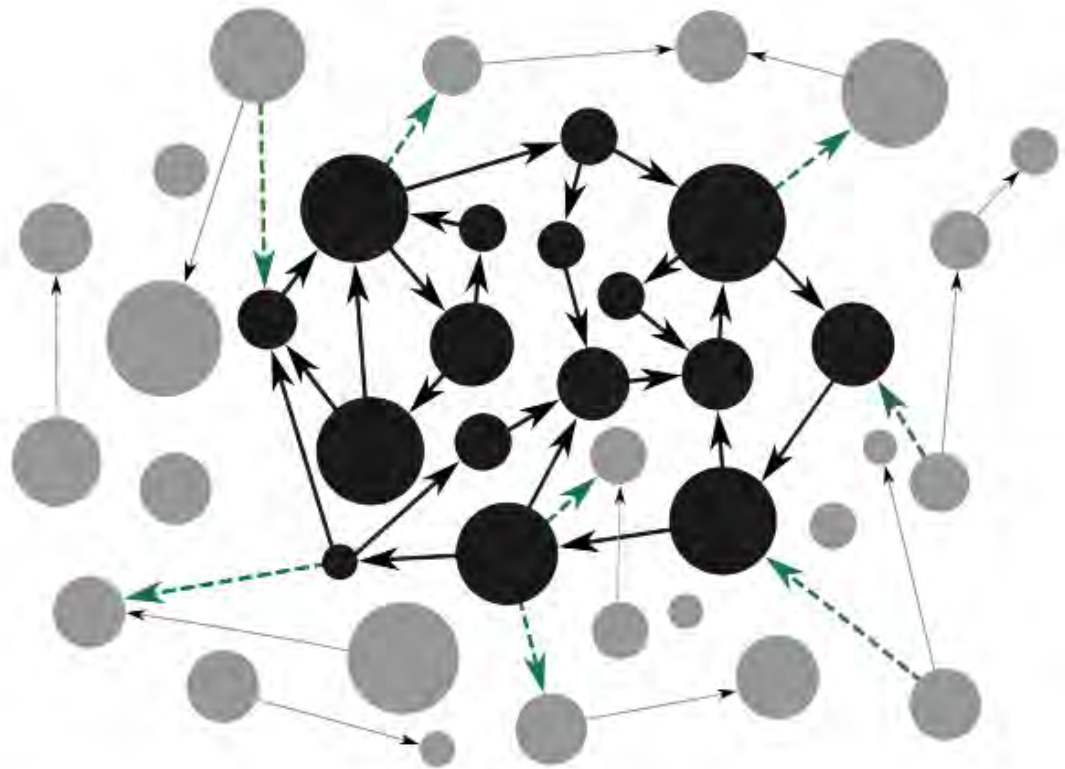
Et est-ce qu'il y a un pattern commun qu'on peut associer à tous les systèmes vivants?



La réponse est oui...

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

( de multiples éléments reliés par des liens **récioproques** avec une causalité **circulaire** favorisant **l'émergence** spontanée de patterns cohérents d'ordre supérieur )



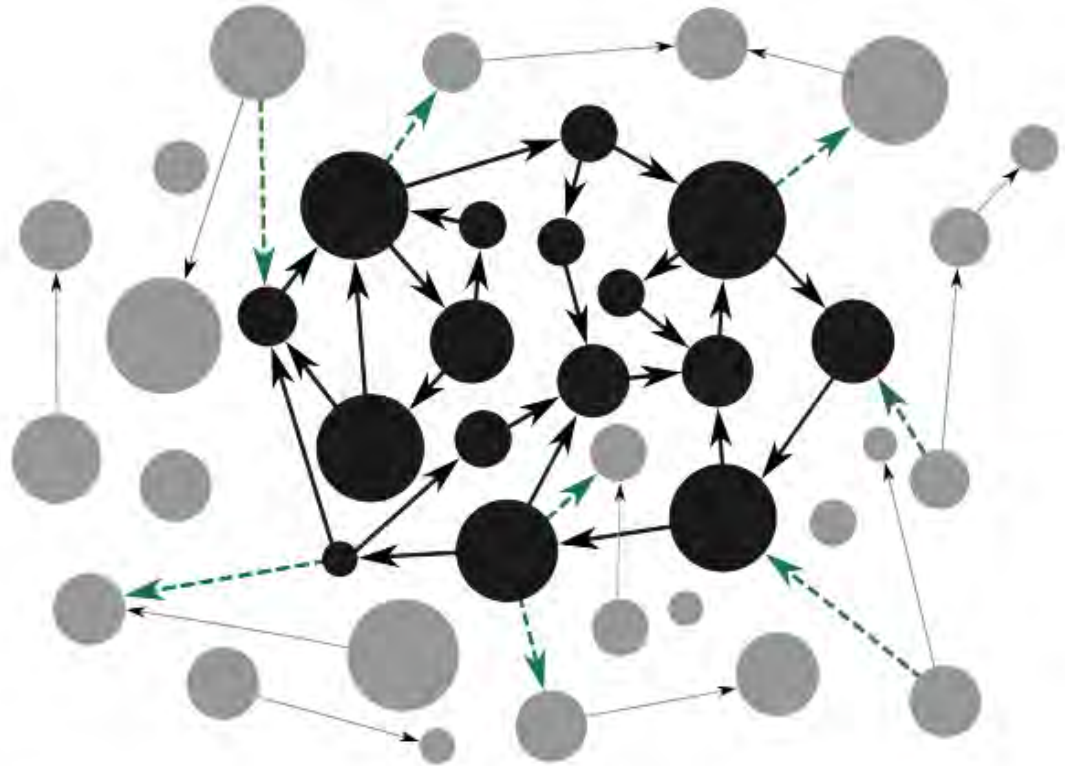
Copyright Ezequiel Di Paolo, 2013. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License.  
[http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en\\_US](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.en_US)

Rappel :

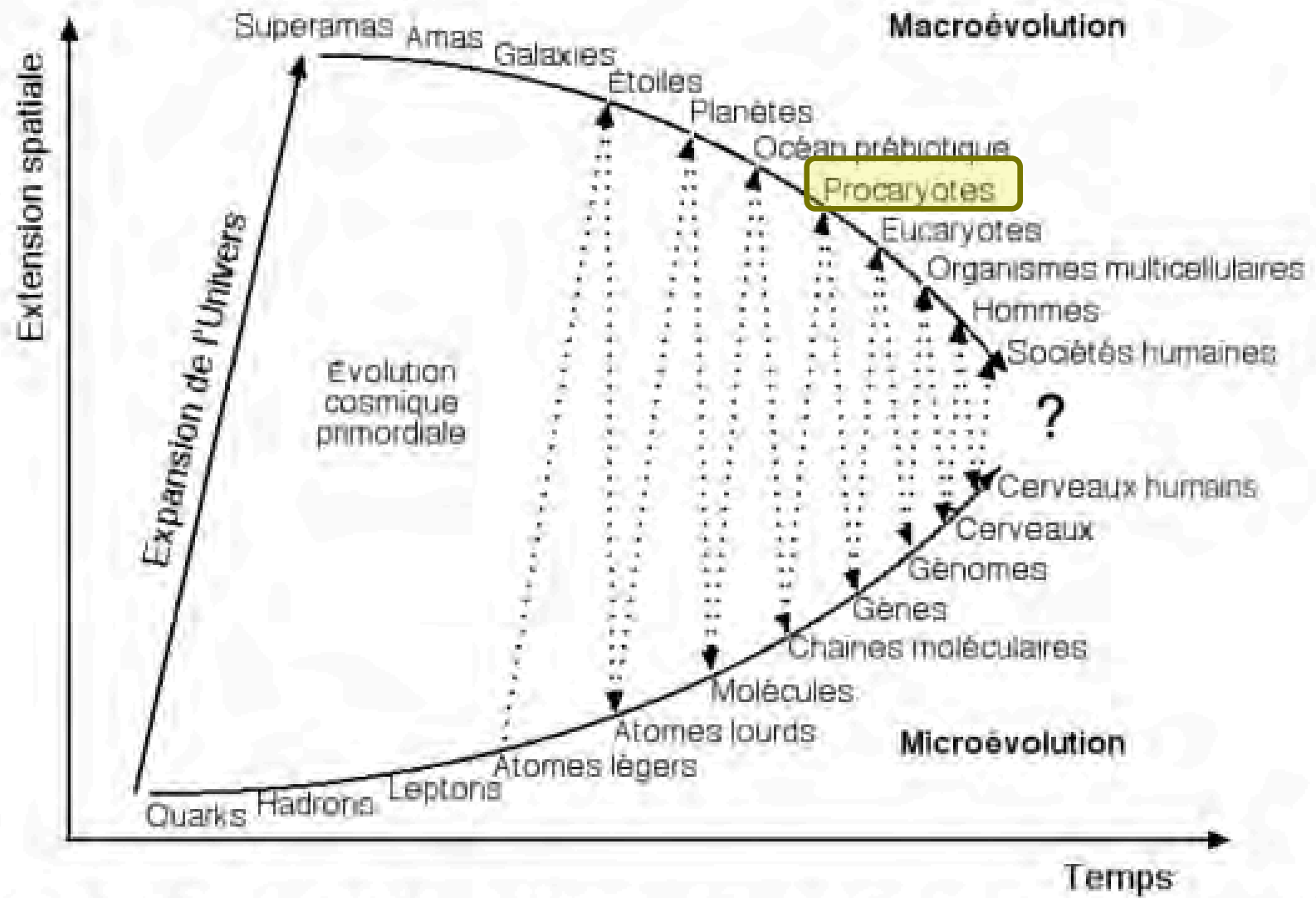
Les « macro-molécules » qui formeront les organismes **vivants** sont donc constituées des **mêmes atomes** que ceux que l'on retrouve dans la matière **inanimée**.

Ils sont même **interchangeables** et sont effectivement constamment **renouvelés**.

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



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)



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

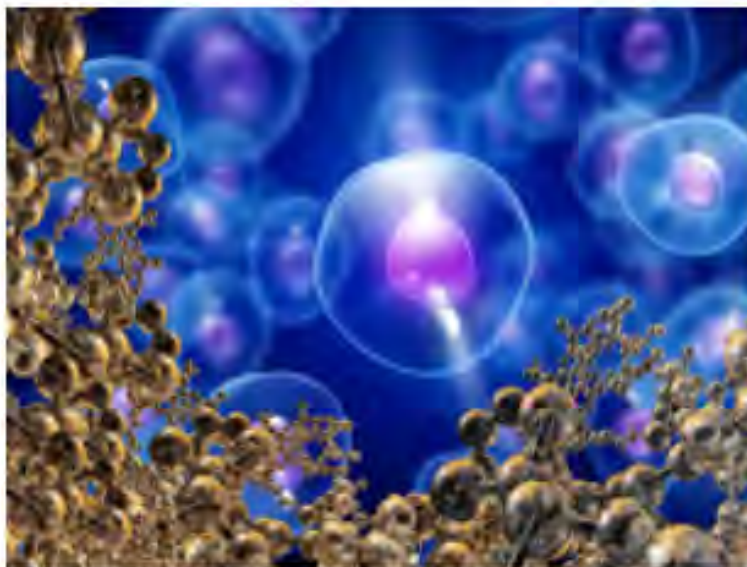


**CONFÉRENCE - AMPHITHÉÂTRE**

19 mars 2015 - 19h00

DU CHIMIQUE AU BIOLOGIQUE

**AINSI VINT LA VIE!**



**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.

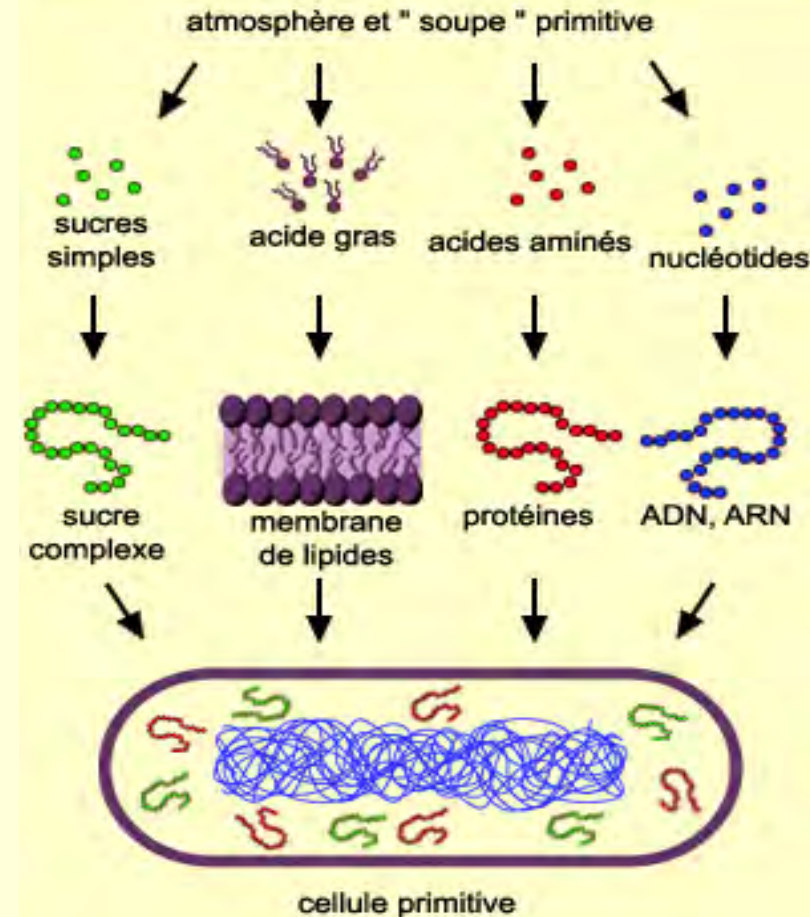
**Christophe Malaterre** est professeur de philosophie des sciences à l'UQAM et

quand apparaît la vie ?

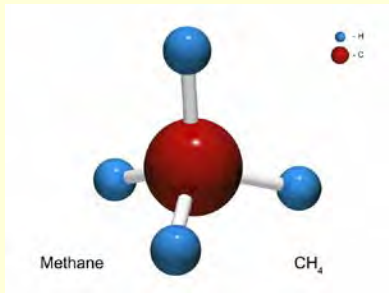
**Les définitions** de la vie (on va y revenir...) sont souvent des listes de critères comprenant des éléments comme :

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

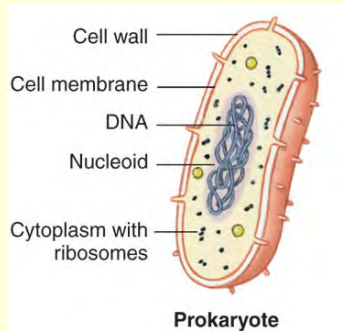
Le biologiste Radu Popa a listé plus de 300 définitions de la vie...dont aucune ne fait l'unanimité !



quand apparaît la vie ?



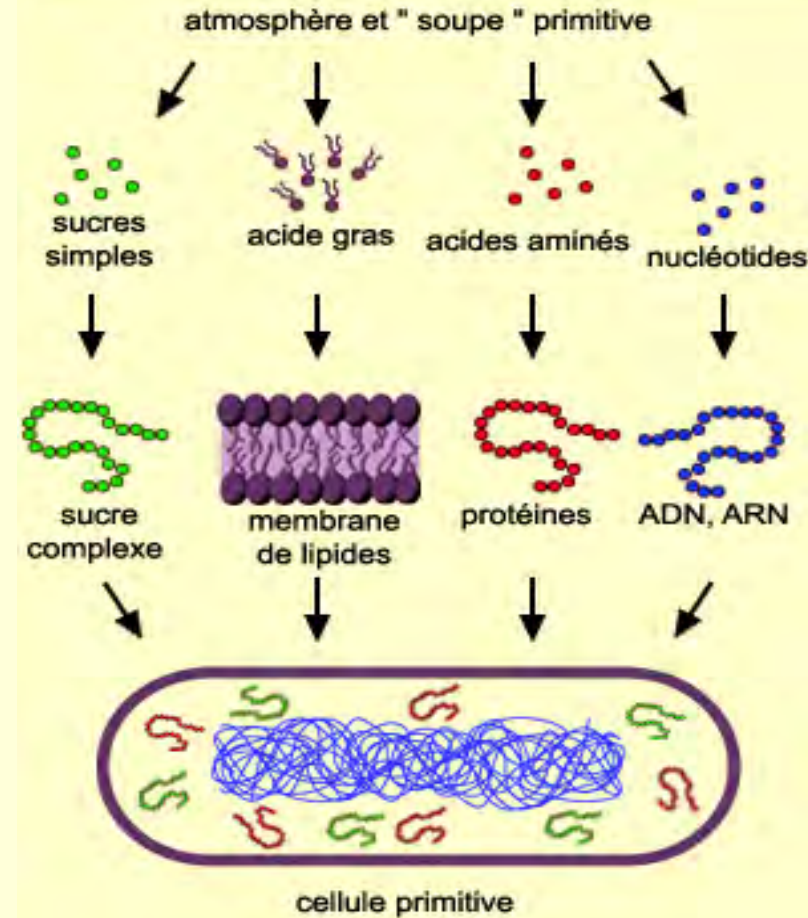
+ ou – vivants  
de différentes  
manières...



Non

un  
gradient

Oui





Différentes machines permettant de voler, utilisant différents principes, comportant certaines forces et faiblesses en fonction de différents aspects considérés...

De même, il pourrait très bien y avoir différentes façon « d'être vivant », comportant certaines forces et faiblesses en fonction de différents aspects considérés...

Développement ou croissance + ou –

Métabolisme + ou –

Motilité + ou –

Reproduction + ou –

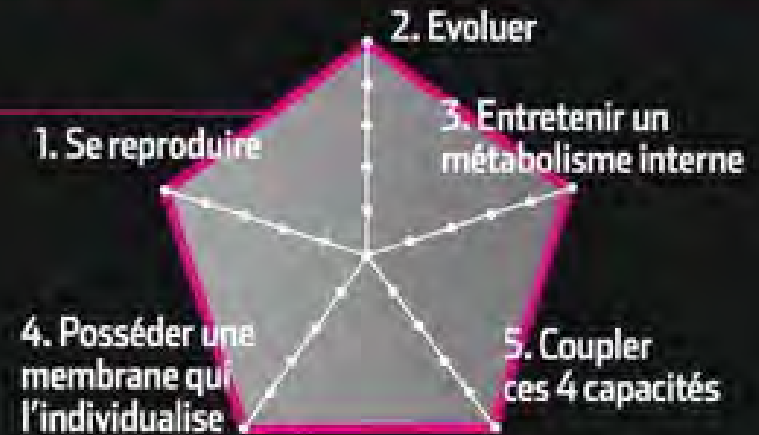
Réponse à des stimuli + ou –

# Différentes « signature de vie »

## Ni êtres vivants ni cailloux...

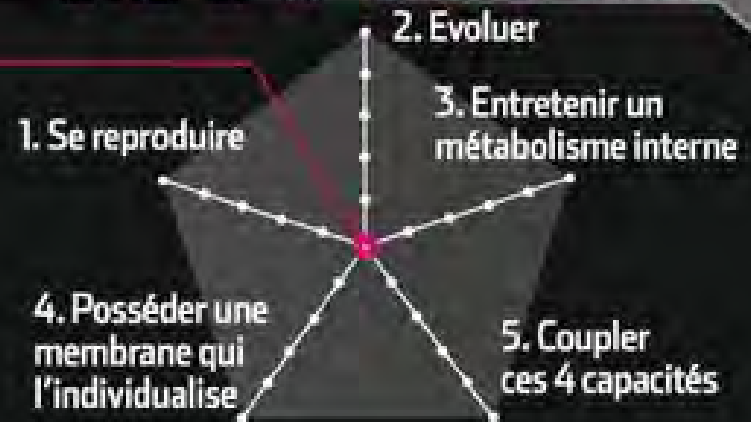
### Être vivant

Ce pentagone rose décrit un être vivant, c'est-à-dire un être capable de remplir ces 5 fonctions retenues pour qualifier la vie (même si elles ne suffisent pas, à elles seules, à la définir).



### Chose inerte

Incapable de se reproduire, d'évoluer, de posséder un métabolisme, une membrane ni, a fortiori, de conjuguer ces 4 facteurs, un caillou, par exemple, ne remplit aucune partie du pentagone.





# Différentes « signature de vie »

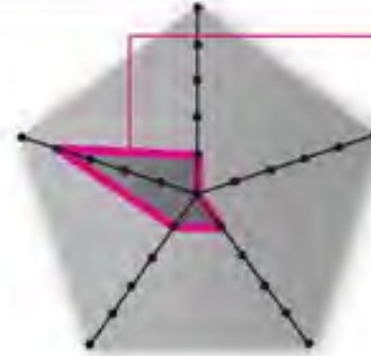
mais des organismes à mi-chemin entre les deux

A MI-CHEMIN  
ENTRE LE VIVANT  
ET L'INERTE, CES  
"PRESQUE VIVANTS"  
POSSÈDENT CERTAINES  
FONCTIONS PHARES  
DE LA VIE



## Virus

Parfois inerte, parfois actif, il est doté de 4 capacités fondamentales : il se reproduit, évolue et possède une membrane qui l'individualise.



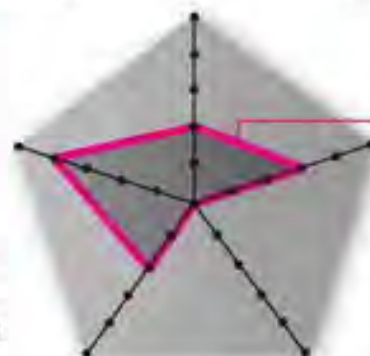
## Prion

Cette protéine anormale est individualisée, elle se reproduit et évolue.



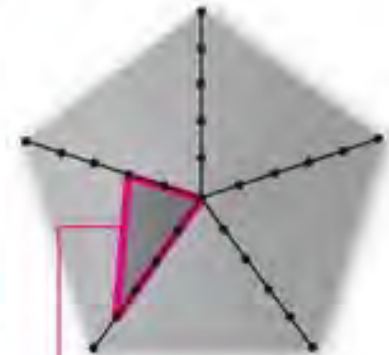
## Pepsine

Cette protéine enzymatique digestive se reproduit (elle s'auto-catalyse) et entretient un métabolisme.



## Ribozyme

Cet ARN est capable de catalyser des réactions, dont sa propre réplication. Il est individualisé, évolue et possède un métabolisme.

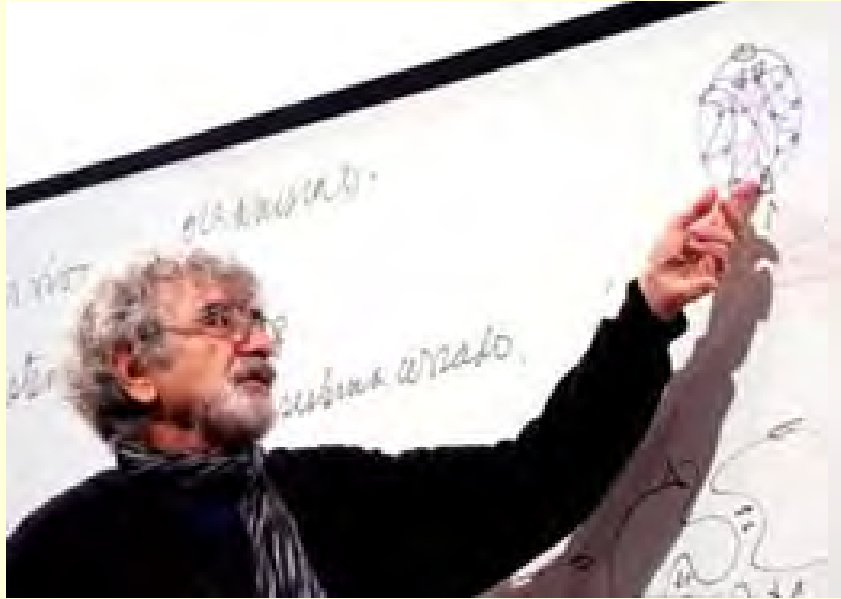


## Liposome

C'est une vésicule individualisée dont la membrane est composée de lipides et qui se reproduit.

Intéressant, mais encore basé sur des caractéristiques de la vie sans chercher à **théoriser une définition minimale d'un être vivant.**

C'est ce que vont tenter de faire Humberto Maturana et Francisco Varela dans les années 1970 avec la notion d'autopoïèse.



« 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

■ *Research Paper*

# The early days of autopoiesis: Heinz and Chile

Requestors must comply with  
Copyright law (Title 17 U.S. Code)

Francisco J. Varela

[ cet article était en même temps d'un hommage à **Heinz von Foerster**,  
personnage important de ce qu'on a appelé la « deuxième cybernétique » ]

## Présenté dans :

Modèles et concepts en science : comment naissent-ils ?

[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop\\_pres/II\\_COURS\\_5%20\(6%20d%E9c%202011\)%20-%20v3pdf.pdf](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/pop/pop_pres/II_COURS_5%20(6%20d%E9c%202011)%20-%20v3pdf.pdf)

Et je n'ai pas pu m'empêcher d'en mettre quelques diapos pour faire un peu d'histoire et de sociologie des sciences....



## Les États-Unis

Ayant reçu une bourse de son département, Varela quitte le Chili le 2 janvier **1968** pour le **Harvard University**. Il arrive durant une tempête de neige, avec un anglais approximatif, et sachant que s'il n'avait pas des

« A » partout, sa scolarité lui serait enlevée rapidement.

Les premiers mois ont donc été difficiles, mais après avoir trouvé ses repères, Varela plonge dans ce que cette l'université a à lui offrir :

anthropologie, évolution avec le pas très orthodoxe **S. Jay Gould**, maths avec la théorie des systèmes dynamiques non linéaire qui venait d'être découverts, philosophie et linguistique avec **Chomsky, Putnam et Quine**.

Varela dit ne pas se souvenir d'une seule journée où il n'a pas absorbé toute cette connaissance avec un appétit féroce!

"J'avais une passion, un feu dévorant. Je voulais tout apprendre [...]. J'enregistrais, pour mieux me battre pour l'indépendance de l'Amérique latine. Je n'avais rien à perdre. Quoi qu'il arrive, j'allais repartir au Chili et créer un autre type de science, avec d'autres finalités."

Maturana va aller visiter plusieurs fois Varela pendant que celui-ci faisait son doctorat à Harvard pour continuer à discuter leurs idées.



Comme par exemple au **printemps 1969**, lorsque Von Foerster avait invité Maturana à son labo aux États-Unis pour quelques mois, ce qui coïncidait avec un congrès sur « Cognition : A Multiple View ».

Maturana et von Foerster, 1974.

<http://bcl.ece.illinois.edu/KenWilsonBCLPhotos/index.htm>

Maturana y présente pour la première fois un exposé de ses idées sur ce qu'il appelait la nature auto-référentielle des êtres vivants, et aussi pour identifier définitivement la **notion de représentation** comme le **pivot épistémologique** qui devait être changé.

Cet article abordait sommairement **une question qui avait intrigué Varela** à Harvard quand il était assistant dans le cours de biologie cellulaire donné par les **deux prix Nobel George Wald** (photopigments...) et **James Watson** (structure ADN, avec Crick...) :

on parlait en terme de « self-maintenance » à propos de la constitution de la cellule, mais **personne**, même pas les deux prix Nobel réunis, **ne savait ce que cela signifiait véritablement !**

Et quand Varela poussait la discussion là-dessus, la réaction habituelle était : « Francisco veut encore faire de la philosophie ! »



Après avoir obtenu officiellement son doctorat en juin 1970, Varela va refuser des postes de chercheur aux États-Unis pour retourner au Chili dans l'espoir de continuer à creuser les anomalies du paradigme dominant qui s'étaient accumulées pour lui aux USA.

Il revient au **Chili le 2 septembre 1970** et il dira de **l'élection d'Allende 2 jours plus tard** qu'elle fut sa deuxième graduation !





# Autopoïèse

Biology of Language: The Epistemology of Reality

Humberto R. Maturana  
(1978)

- Humberto Maturana
- Francisco Varela



Dès ses premiers mois aux côtés de Maturana à l'automne 1970, Varela s'attaque à la découverte de **l'organisation minimale des organismes vivants**.

« Je me suis mis à travailler avec Maturana, comme collègue cette fois. Nous avons connu six mois d'état de grâce. Une inspiration insensée ! »

Ils constatent que la cellule fabrique sans arrêt sa propre membrane et qu'elle **s'autodistingue ainsi sans cesse de l'arrière-plan**.

Elle constitue ainsi son **autonomie**

et n'appréhende le réel qu'à travers cette **cohérence interne**.



(Avant-)dernière remarque socio-historico-épistémologique...

Comme ce fut souvent le cas dans l'histoire des sciences, il se créa une dynamique créative très prolifique entre :

un **interlocuteur mature qui amène expérience et considérations passées**, Maturana,

et un **plus jeune scientifique qui amène des perspectives et des idées plus fraîches**, Varela.

Par ailleurs, même si l'on peut clairement faire remonter l'origine du concept d'autopoïèse à cette époque, Varela fait remarquer qu'on ne peut pas **identifier une ou deux conversations particulière qu'il l'aurait fait "découvrir"**.

Entre une nouvelle idée bien définie et ses prémices encore floues, il existe un **saut qualitatif**, mais un saut dont **le moment est très difficile à cerner**.

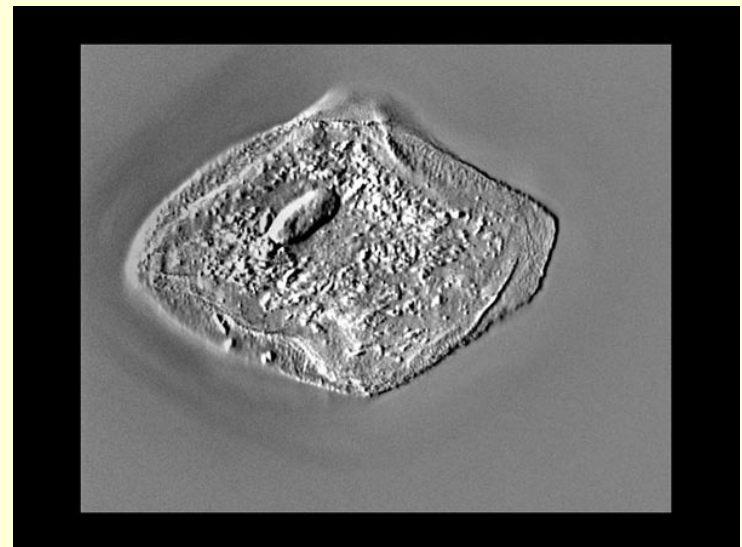


De sorte que déjà en mai 1971, le terme **autopoïèse** apparaît dans les **notes de Varela**.

Varela se souvient qu'ils voulaient un nouveau mot parce que ce dont ils voulaient parler était nouveau.

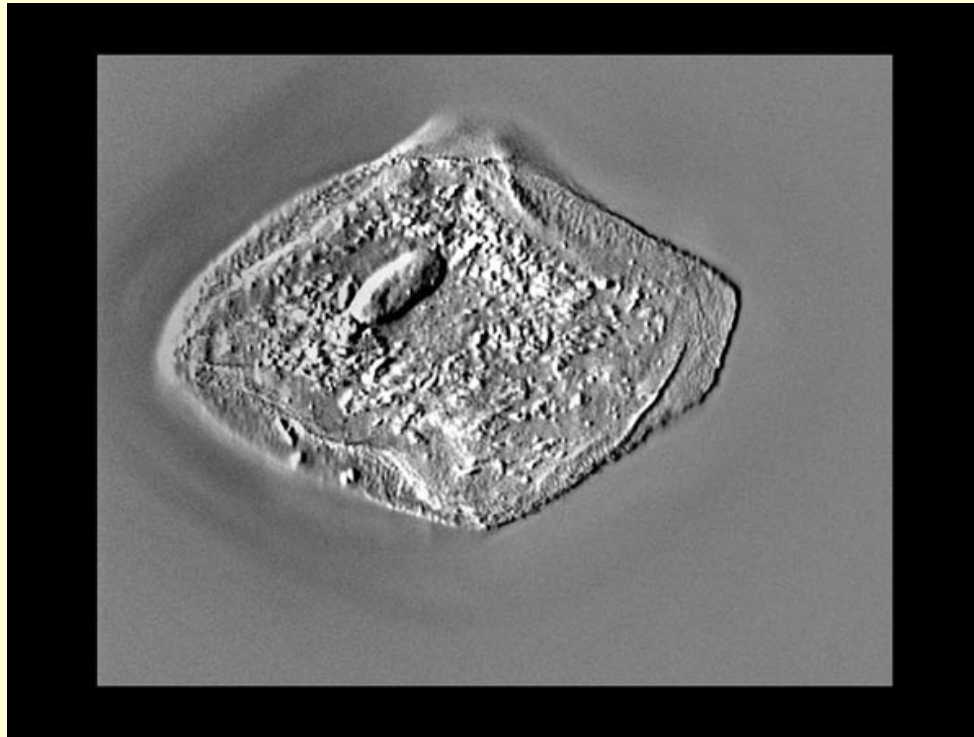
Du grec autos, soi, et poiein, produire, un système **autopoïétique** est :

un réseau complexe d'éléments qui régénèrent constamment, par leurs interactions et transformations, le réseau qui les a produits.

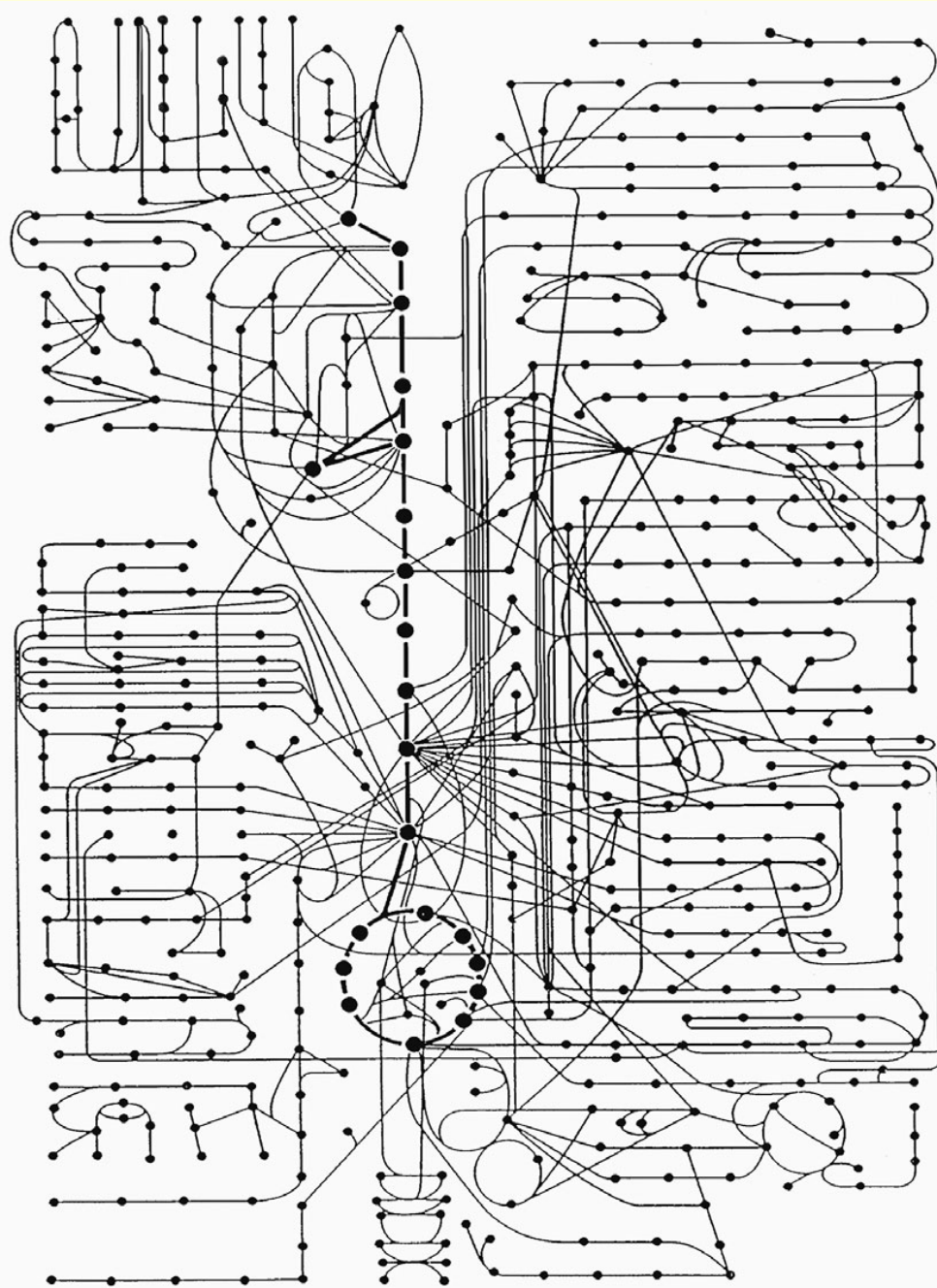


An image of a human buccal epithelial cell obtained using Differential Interference Contrast (DIC) microscopy ([www.canisius.edu/biology/cell\\_imaging/gallery.asp](http://www.canisius.edu/biology/cell_imaging/gallery.asp))

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

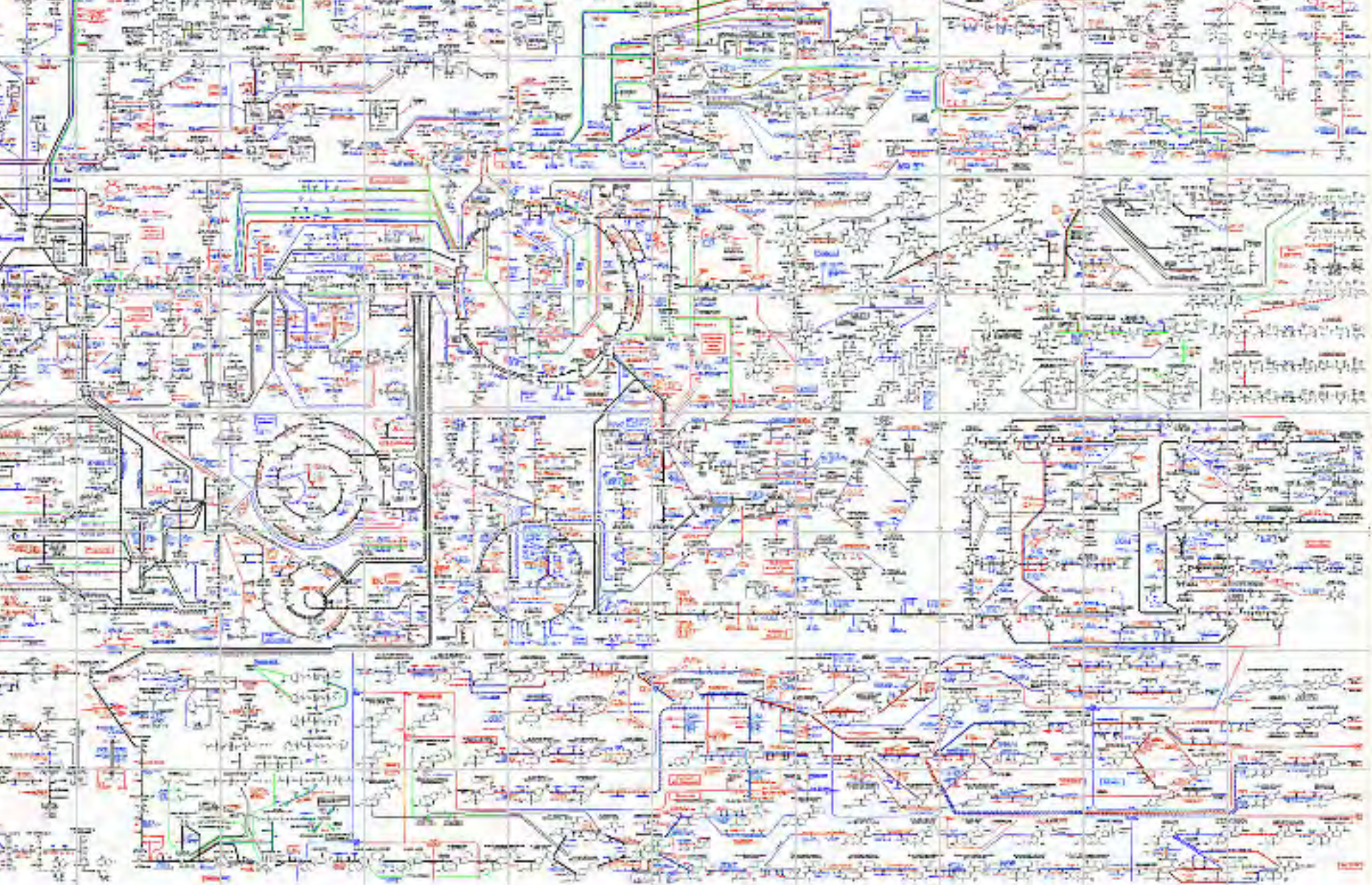


An image of a human buccal epithelial cell obtained using Differential Interference Contrast (DIC) microscopy  
([www.canisius.edu/biology/cell\\_imaging/gallery.asp](http://www.canisius.edu/biology/cell_imaging/gallery.asp))



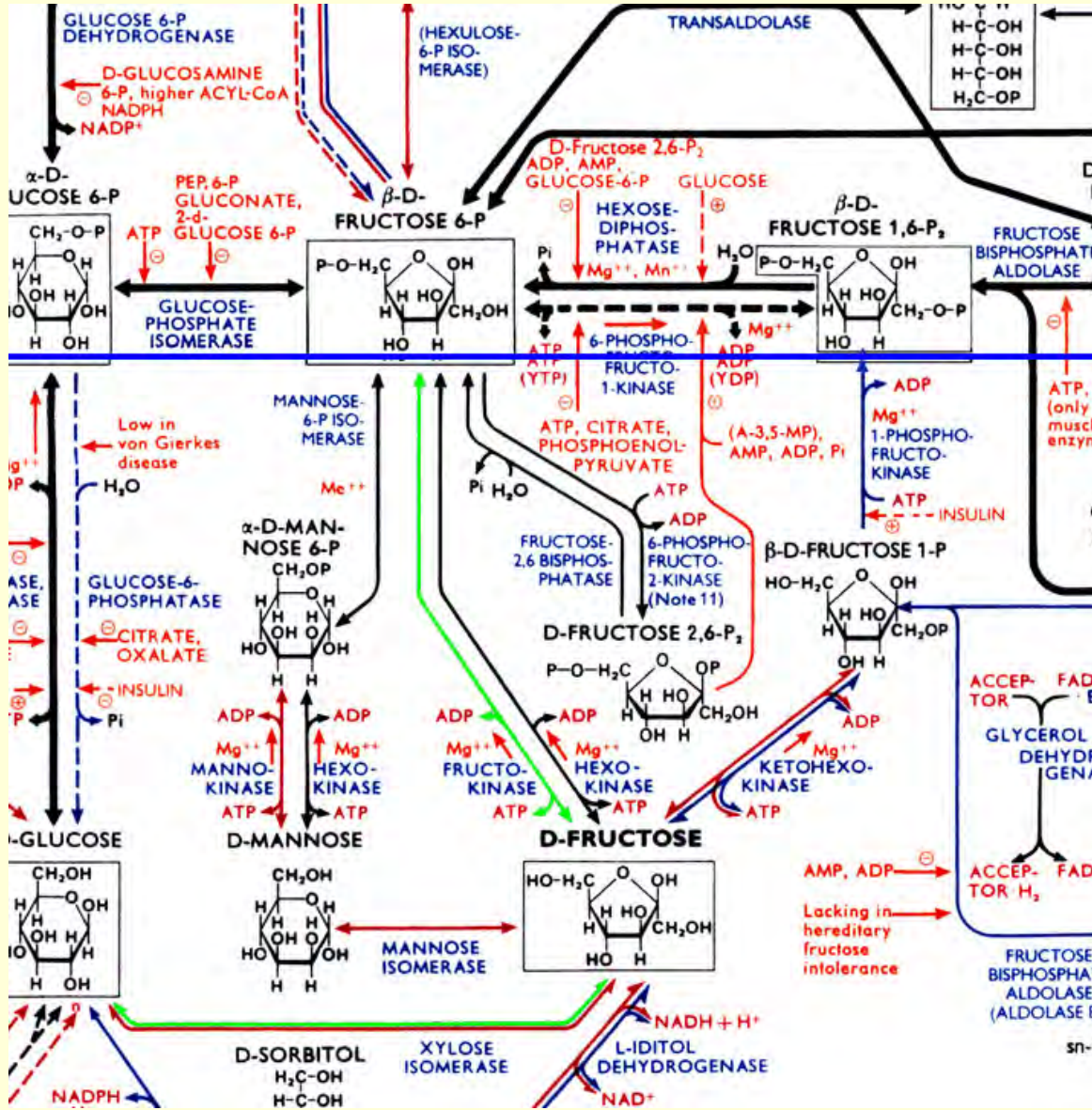
« un réseau »...

= des éléments qui entretiennent  
des relations

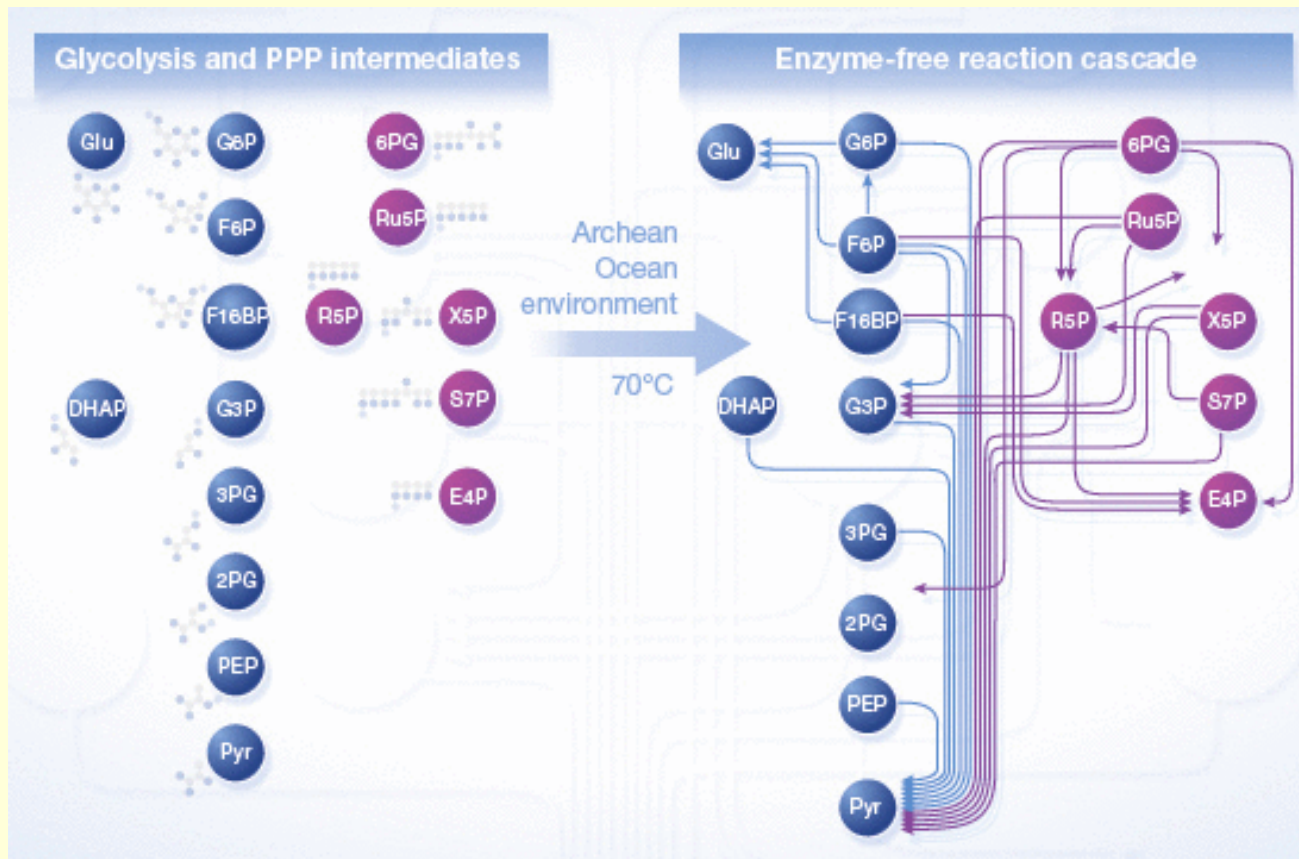


« un réseau complexe »... = cascades de réactions biochimiques dans une cellule

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



Ce qu'on appelle le « métabolisme »



« *metabolism could be of prebiotic origin.* »

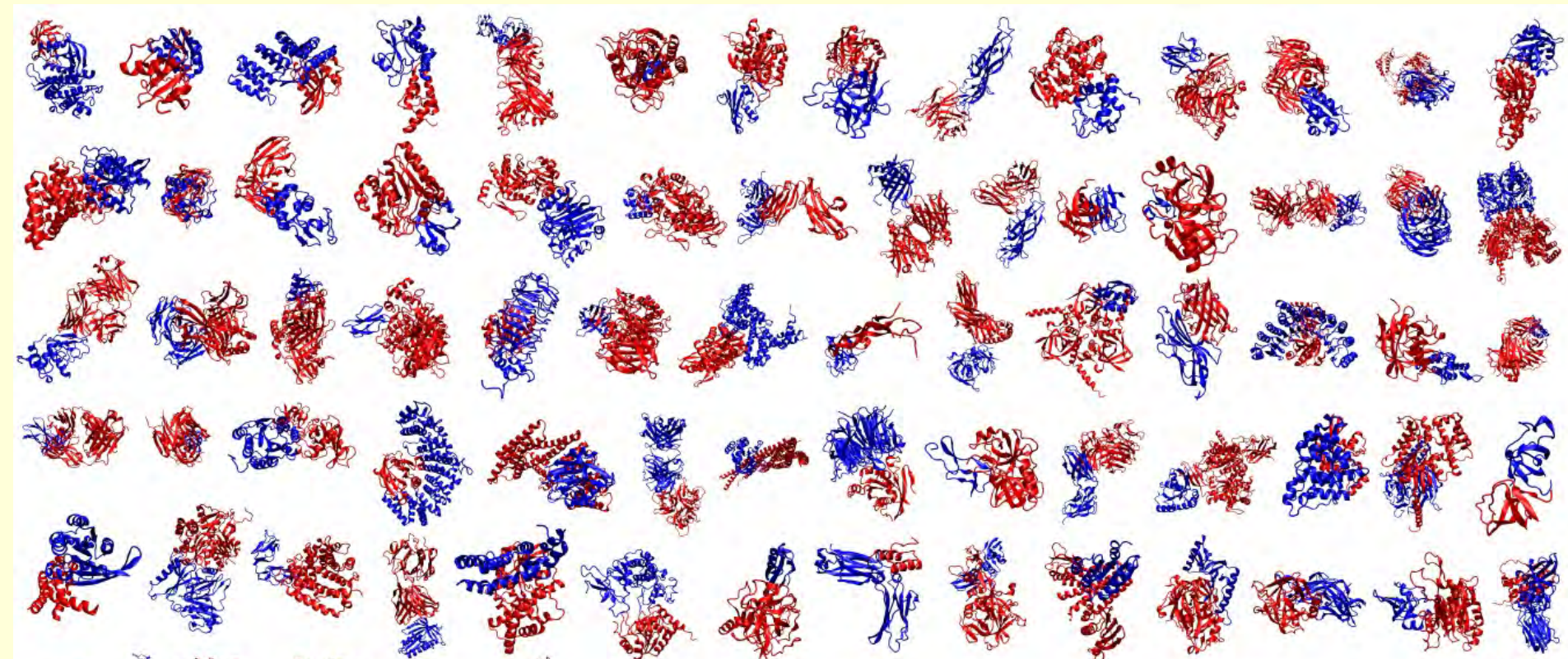
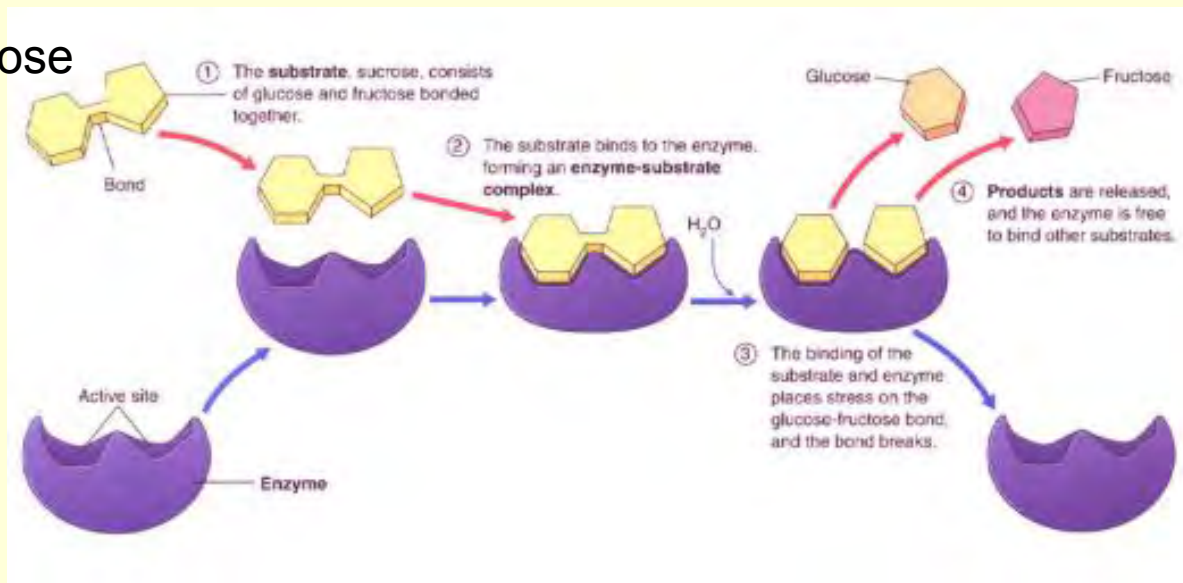
**Non-enzymatic glycolysis and pentose phosphate pathway-like reactions in a plausible Archean ocean**

Markus A Keller, Alexandra V Turchyn, Markus Ralser

Published **25.04.2014**

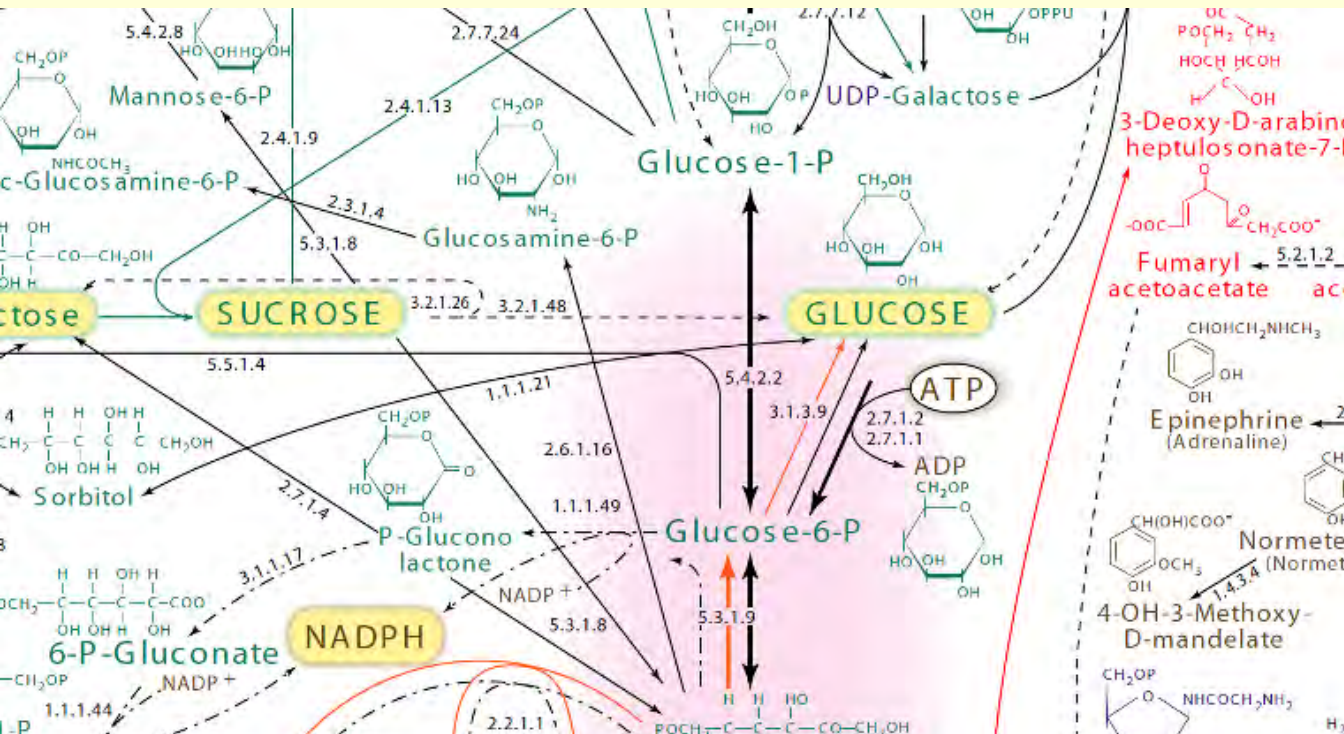
<http://msb.embopress.org/content/10/4/725>

# sucrose

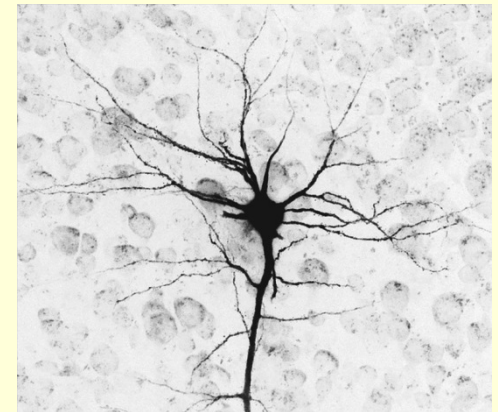




« un réseau complexe d'éléments »... : enzymes (protéines), ADN, etc.

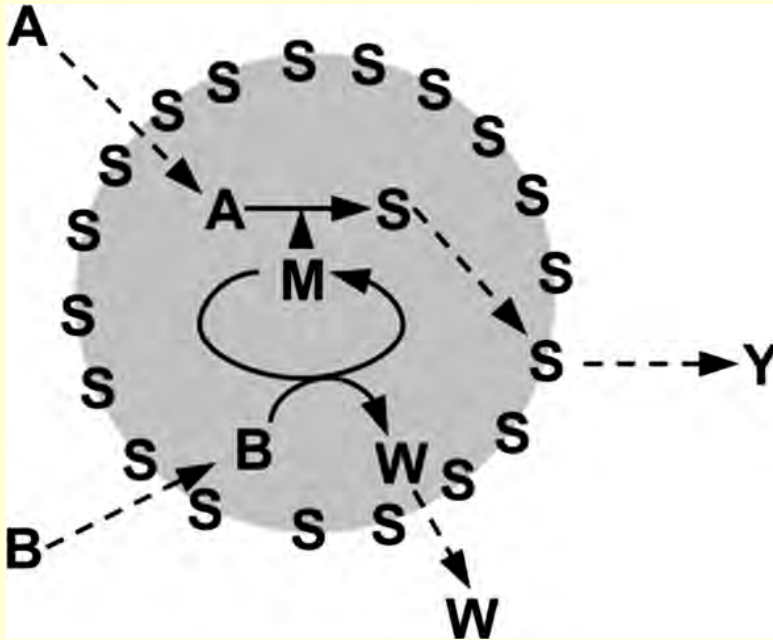


..qui régénèrent constamment, par leurs interactions et transformations, le réseau qui les a produits.



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

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



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

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

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

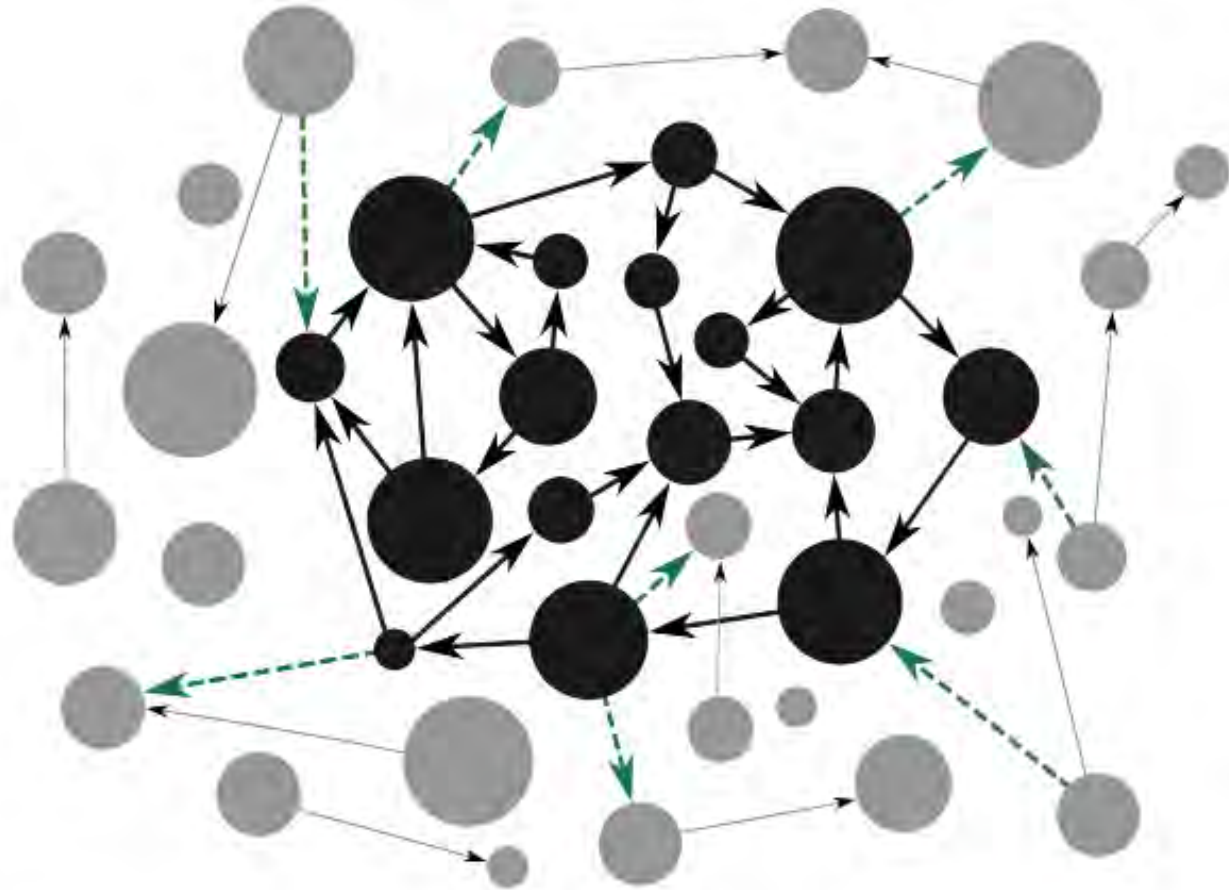
(mais le système est **fermé** du point de vue **opérationnel**)

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

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

**En noir** : une cellule

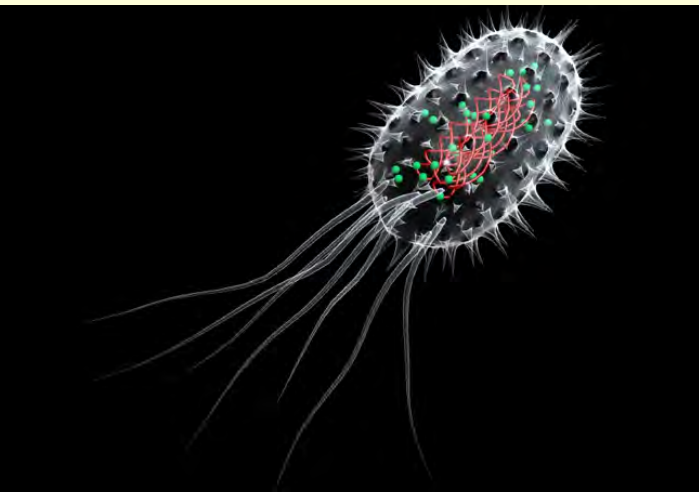
(des molécules se  
fixent sur sa  
membrane, des ions  
traverse cette  
membrane, etc.)



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

**Petite parenthèse sur la notion de frontière,**  
ou un avant-goût de la semaine prochaine et des dernières  
séances...

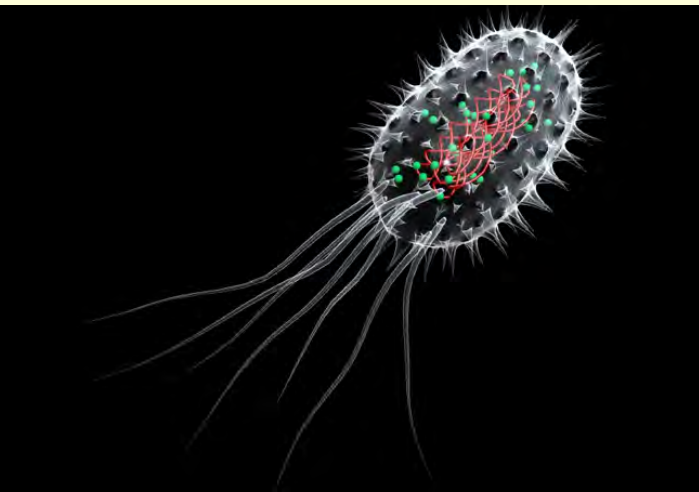
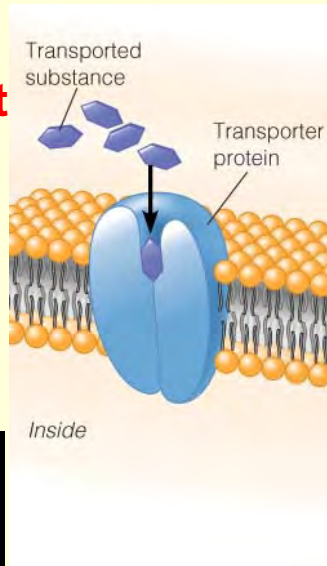
On va prendre l'exemple d'une bactérie mobile qui nage dans un  
milieu aqueux en remontant un **gradient de sucrose**  
(dont on va reparler dans la deuxième partie de la séance)



La bactérie tourne au hasard jusqu'à ce qu'elle sente le gradient de molécules de sucre, grâce à des récepteurs sur sa membrane.

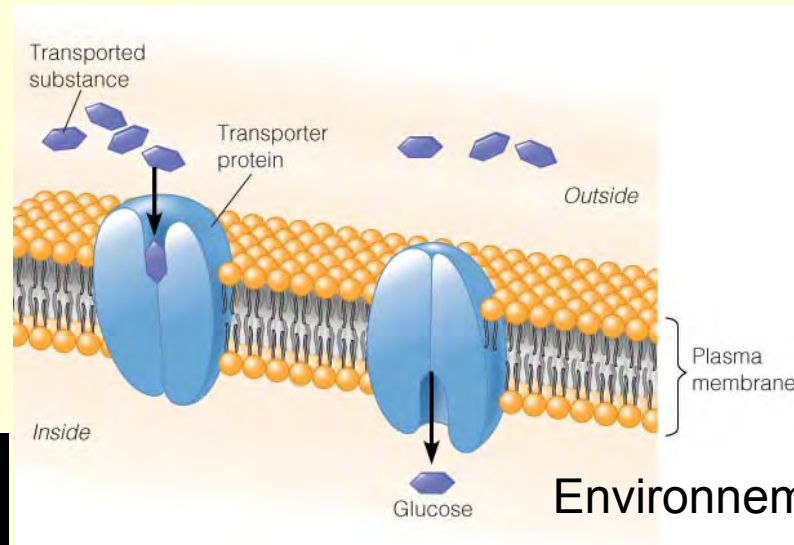
Environnement

Cellule (agent)

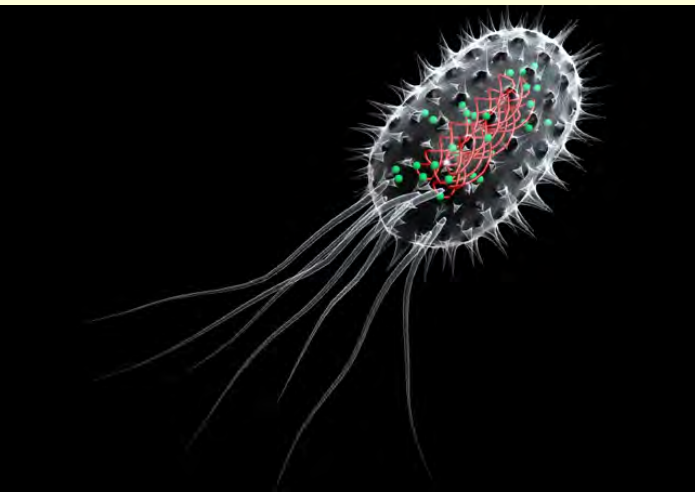


Varela nomme « **couplage structurel** » les relations d'un tel système autopoïétique avec son environnement.

“We think [that it ] points to a **direct coupling** between animal and environment.”  
(Bruineberg & Rietveld  
<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00599/full> )



Environnement ? Non...



Varela nomme « **couplage structurel** » les relations d'un tel système autopoïétique avec son environnement.

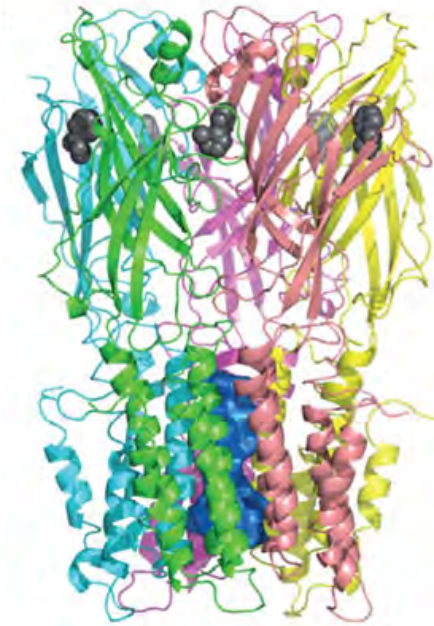
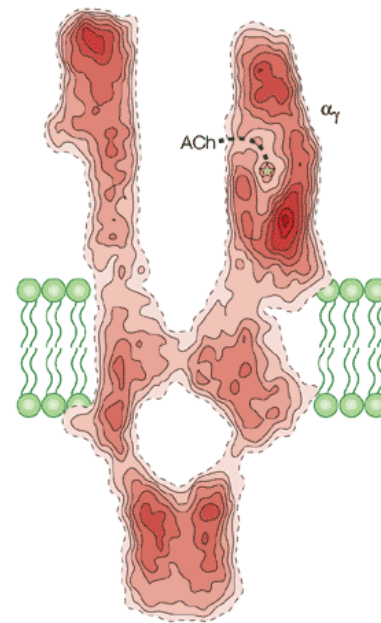
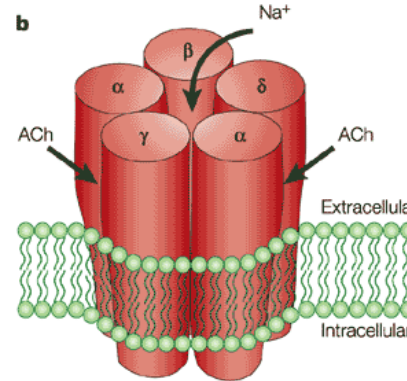
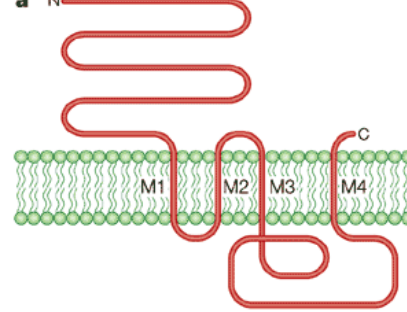
“We think [that it ] points to a **direct coupling** between animal and environment.”

(Bruineberg & Rietveld

<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00599/full> )

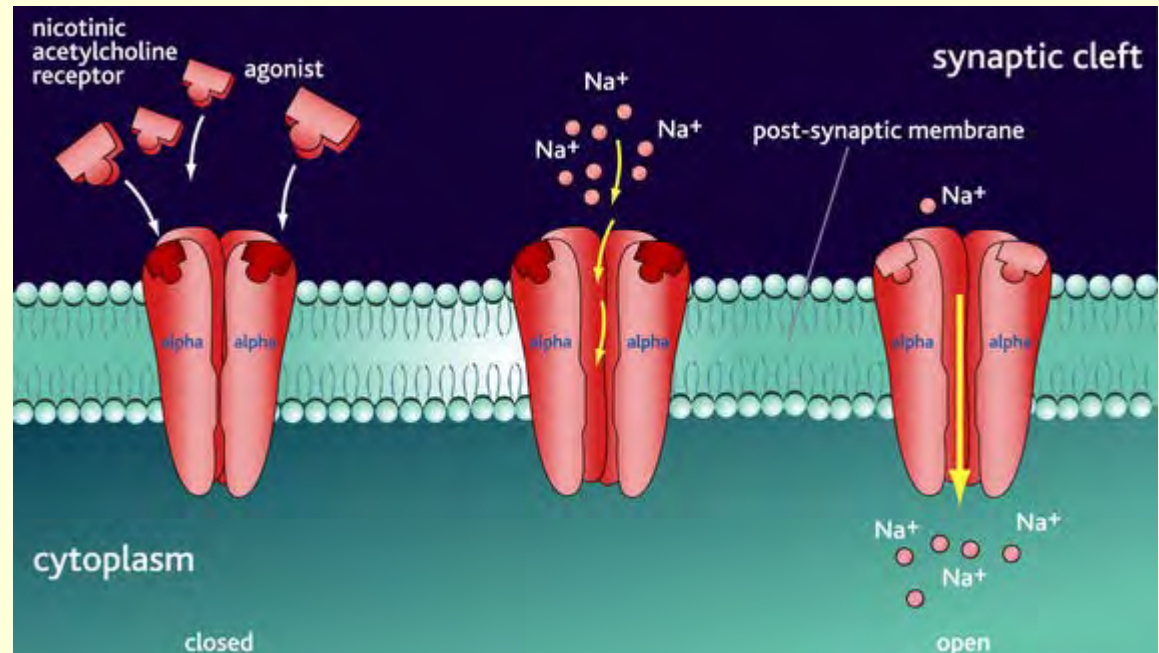
In an autopoietic system, the boundary does not cut the system off from its environment but **defines a coupling of organism-environment.**

(Gallagher et Allen, in press) p.11



Nature Reviews | Neuroscience

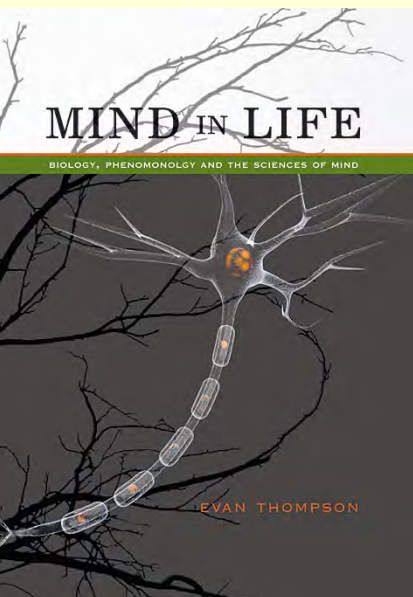
Nature Reviews | Neuroscience



Pourquoi s'attarder sur ce genre de détail ?  
Pourquoi essayer de **comprendre ce qu'est la vie** ?

Parce que la « cognition incarnée » veut tenir compte du corps entier d'un **organisme vivant** !

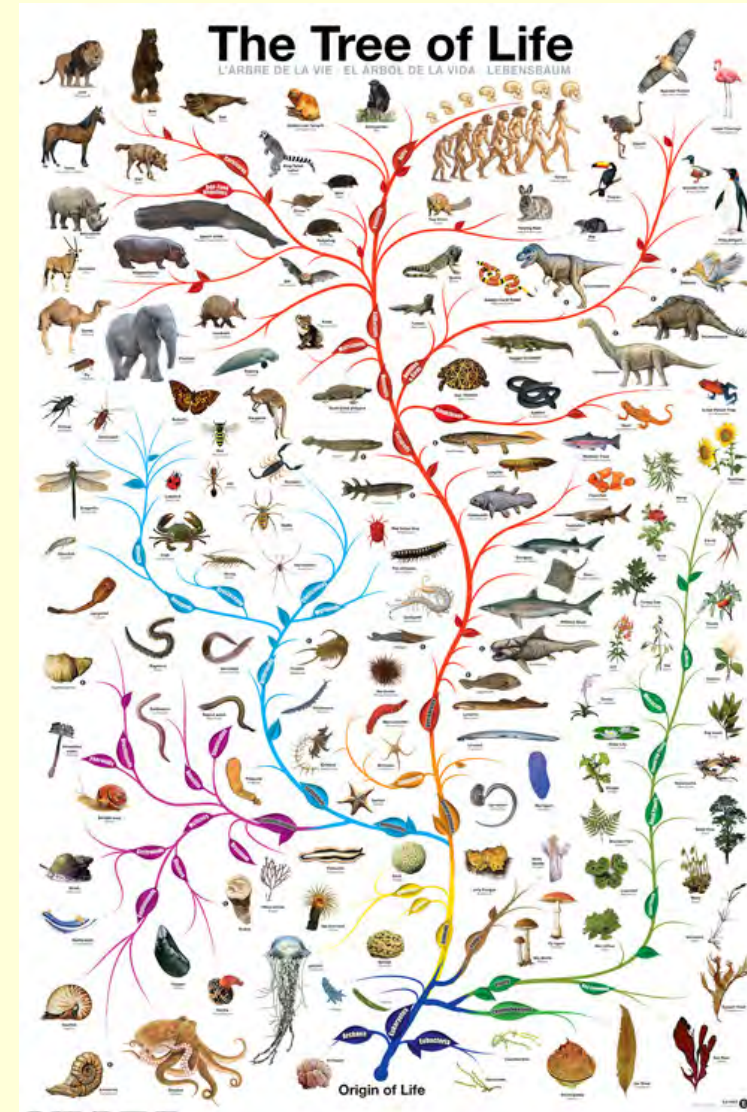
Mais aussi parce que les toutes premières manifestations de la vie ont peut-être déjà à voir avec la cognition...



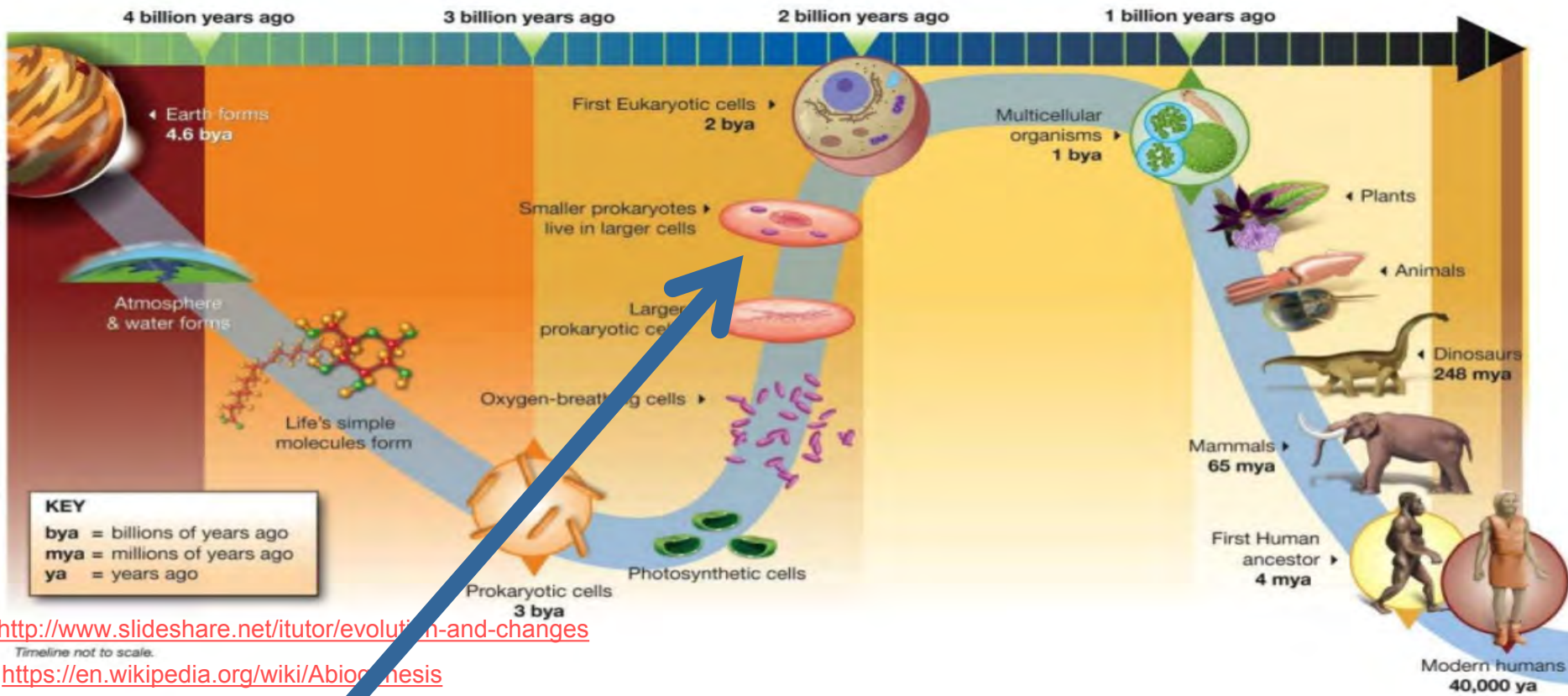
C'est la « **enactivist mind-life continuity thesis** » que l'on va explorer dans la 2e partie de la séance.

« [Cette idée] que l'autopoïèse implique une sorte de contrôle sur le couplage avec l'environnement qui est la cognition dans sa forme minimale »

<http://theboundsofcognition.blogspot.ca/2011/02/wheeler-2005-on-representation-and-24.html>







<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

Avant de poursuivre avec l'évolution des premières cellules, une dernière question, qu'on n'abordera pas à travers les pages de Mind in Life de la 2<sup>e</sup> heure, et qui n'est pas commode...

## Pourquoi apparaît la vie ?

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

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

Car puisqu'ils sont des “structures dissipatives”, les êtres vivants ne violent pas le second principe de la thermodynamique.

Mais les physiciens n'ont jamais été capable jusqu'à ce jour de se servir de la thermodynamique pour expliquer pourquoi la vie a pu se développer.

Lundi, 29 décembre **2014**

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

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



## A New Physics Theory of Life

By Natalie Wolchover, Quanta Magazine on January 28, **2014**

<http://www.scientificamerican.com/article/a-new-physics-theory-of-life/>

La démonstration mathématique de England montre que « quand un **groupe d'atomes** est entraîné par une source d'énergie externe (comme le rayonnement du soleil)

et entouré par un bain de chaleur (comme l'océan ou l'atmosphère),

il **se restructure progressivement afin de dissiper de plus en plus d'énergie** (sous forme de chaleur).

“You start with a random clump of atoms, and if you shine light on it for long enough, it should not be so surprising that you get a plant,” England said. [...]

S'appuyant sur les travaux de **Chris Jarzynski** et **Gavin Crooks** à la fin des années 1990, England a pu montrer que :

**“the more likely evolutionary outcomes** are going to be **the ones that absorbed and dissipated more energy** from the environment’s external drives on the way to getting there.”

The finding makes intuitive sense: **Particles tend to dissipate more energy when they resonate with a driving force** [...]

“This means clumps of atoms surrounded by a bath at some temperature, like the atmosphere or the ocean, should tend over time **to arrange themselves to resonate better and better** with the sources of mechanical, electromagnetic or chemical work in their environments,” England explained.

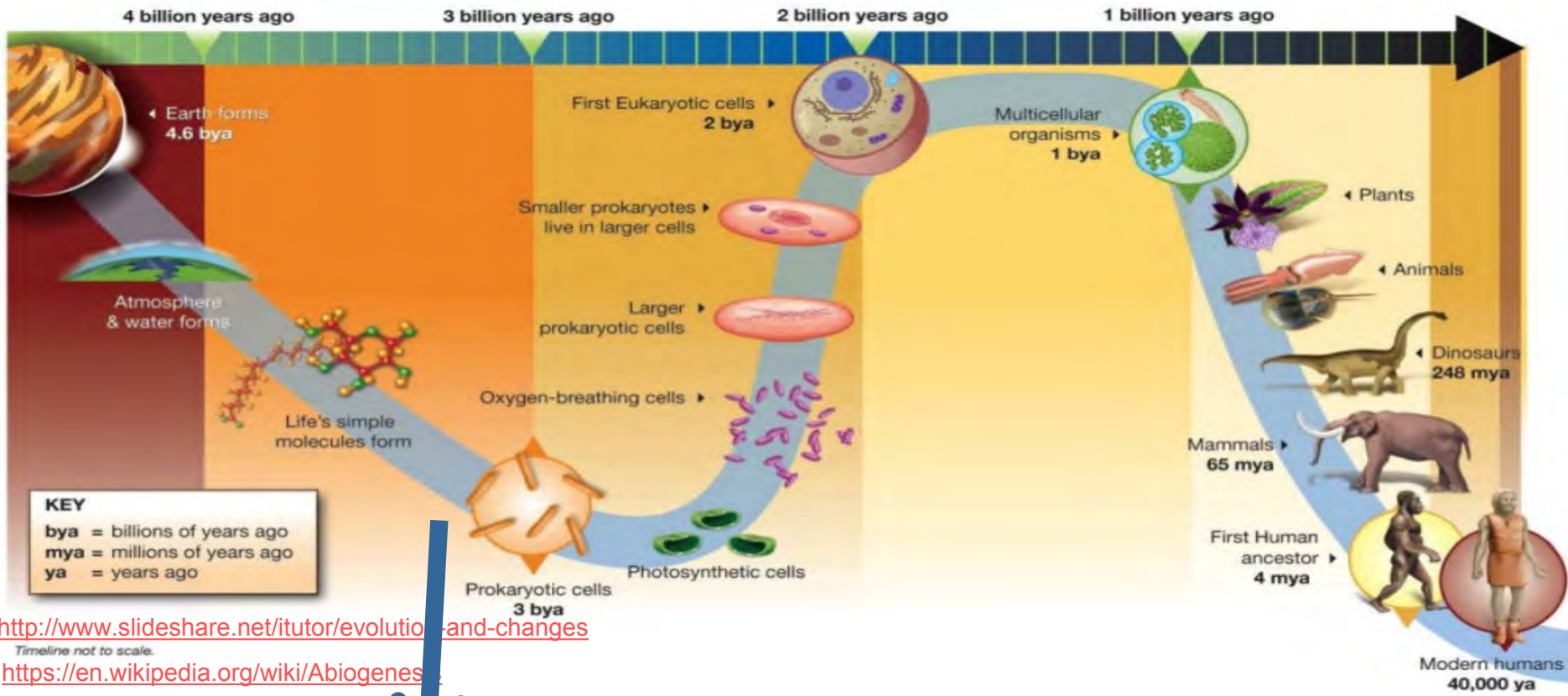
**Self-replication** (or reproduction, in biological terms), the process that drives the evolution of life on Earth, **is one such mechanism by which a system might dissipate an increasing amount of energy over time.**

As England put it, “A great way of dissipating more is to make more copies of yourself.”

Besides self-replication, greater structural organization is another means by which strongly driven systems ramp up their ability to dissipate energy. A plant, for example, is much better at capturing and routing solar energy through itself than an unstructured heap of carbon atoms.

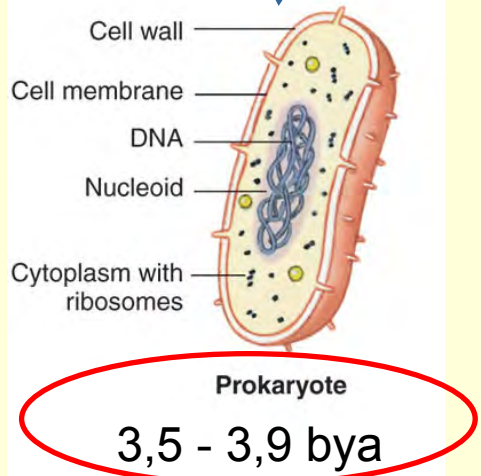
Thus, England argues that under certain conditions, matter will spontaneously self-organize.

This tendency could account for the internal order of living things and of many inanimate structures as well.

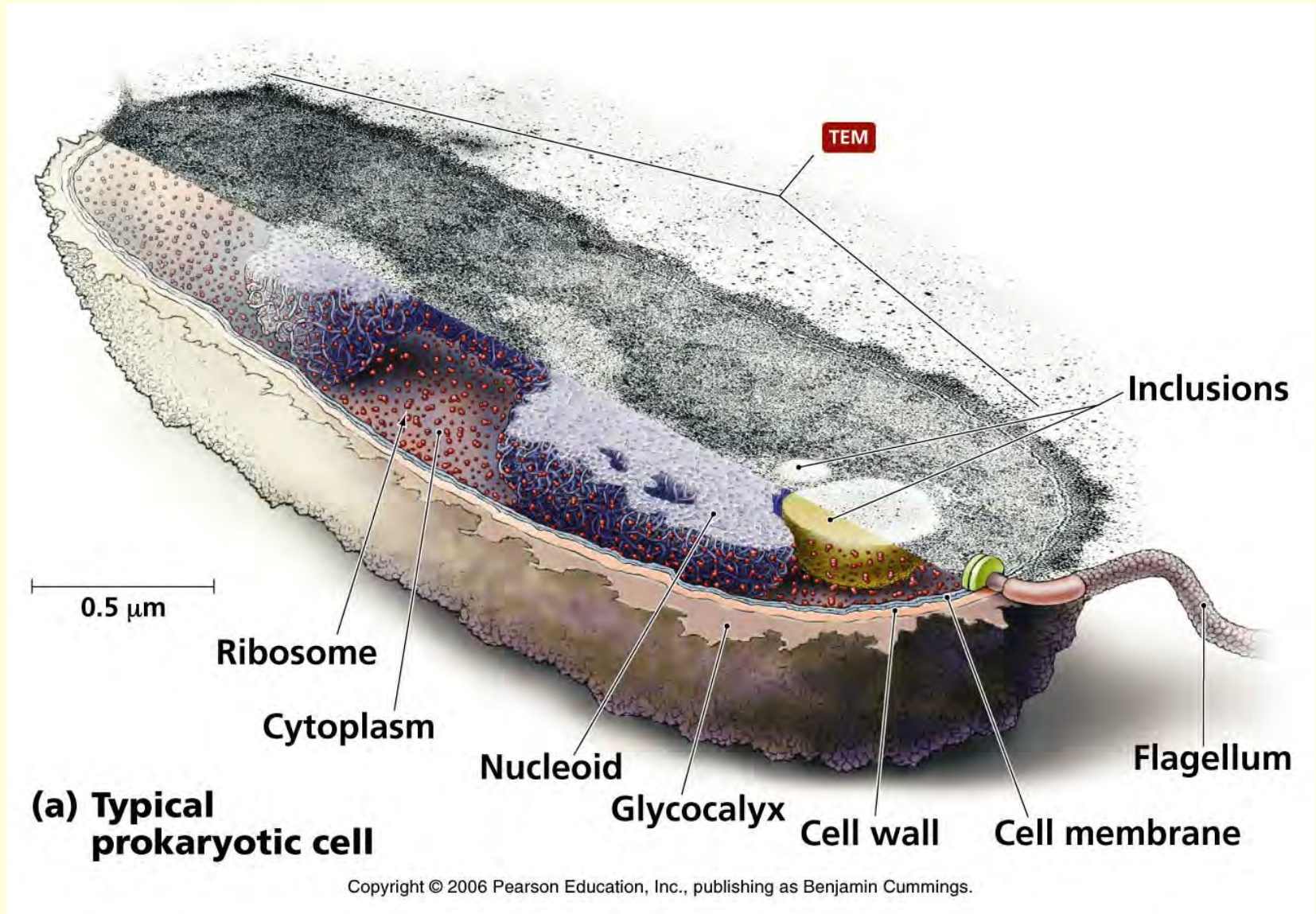


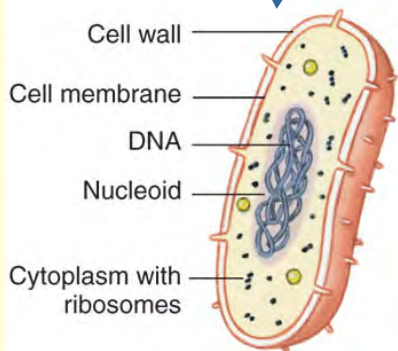
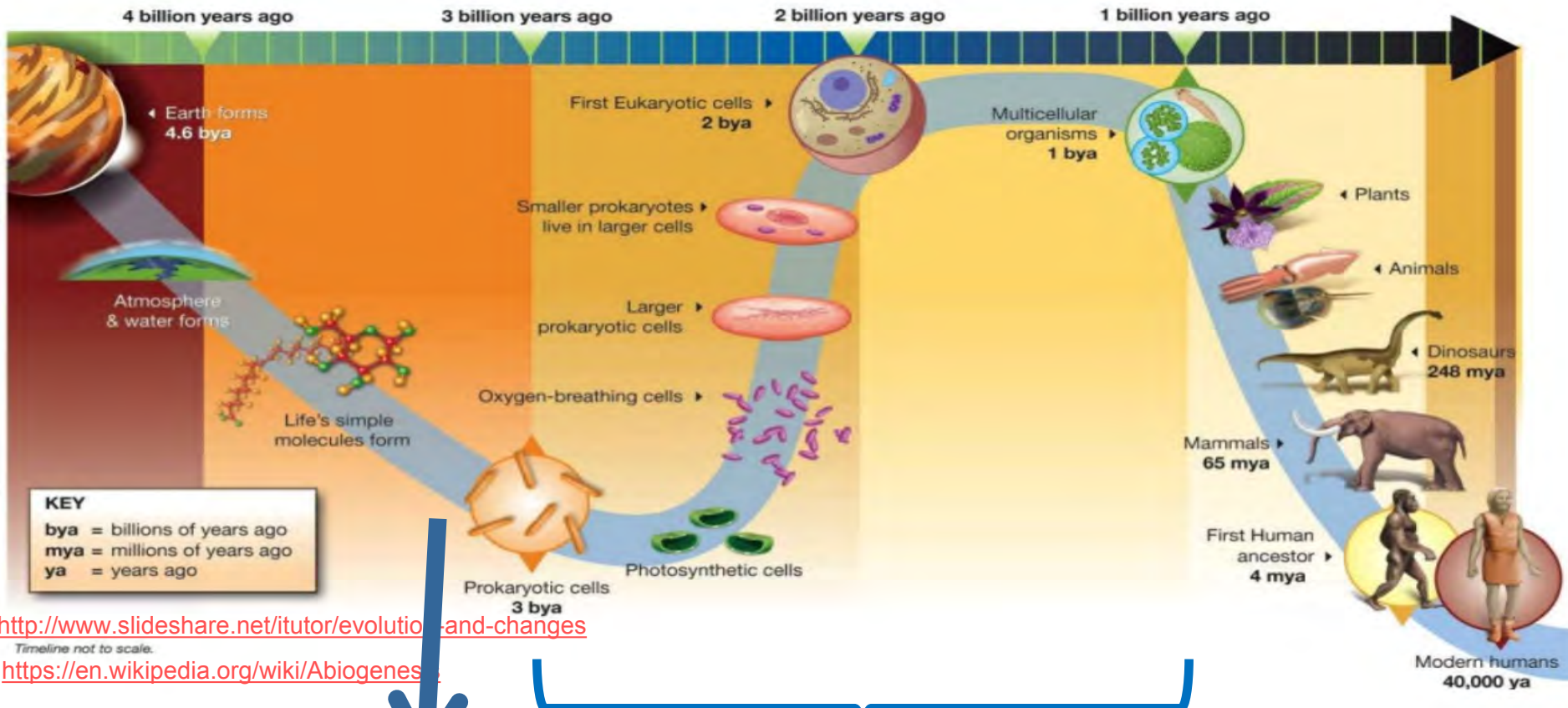
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>

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



Les premières cellules vivante sont déjà infiniment complexes !



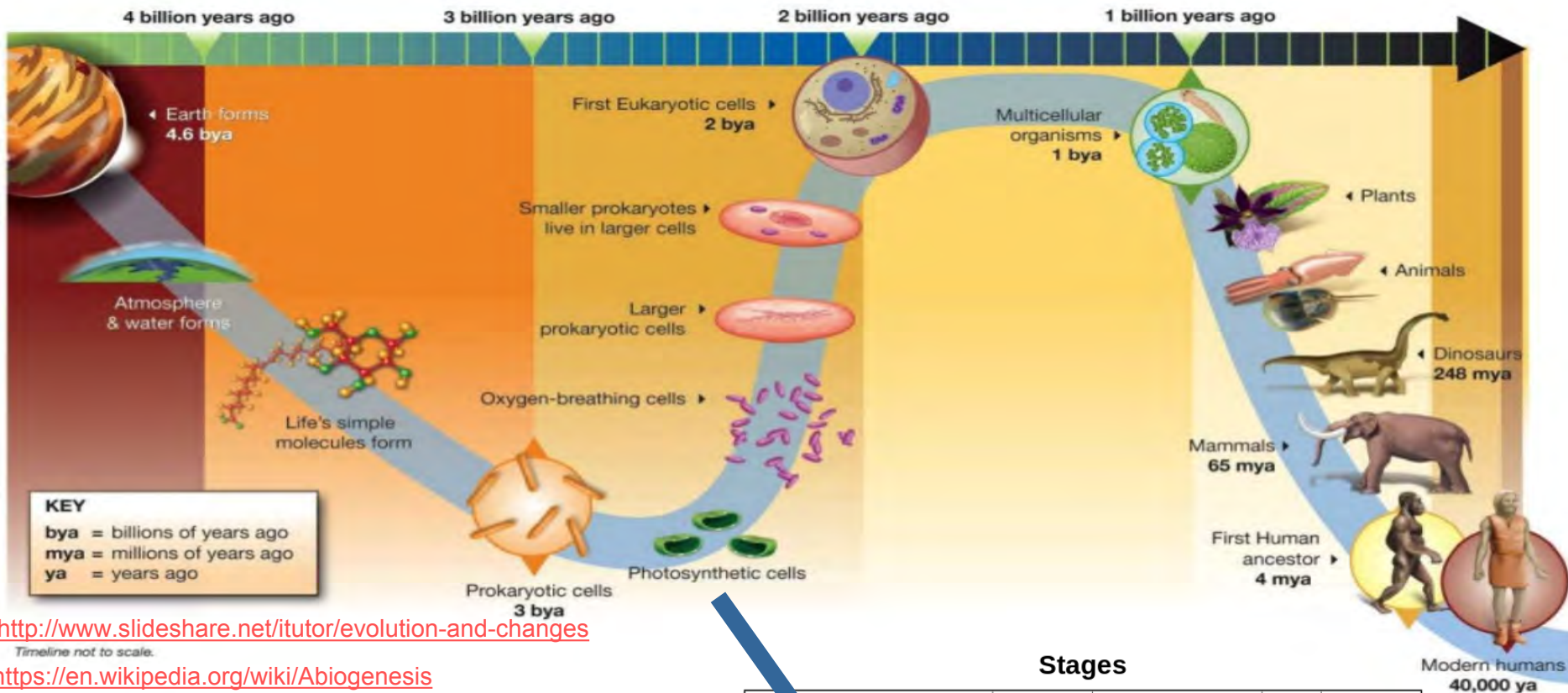


Prokaryote

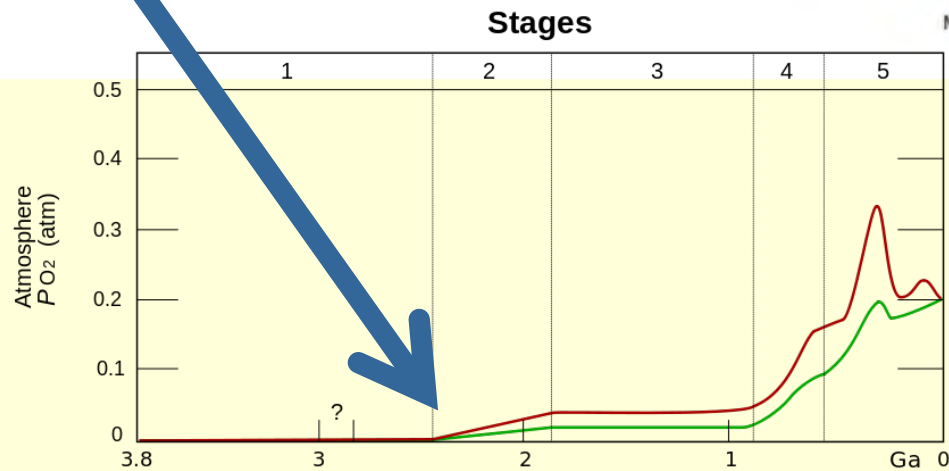
3,5 - 3,9 bya

Extending for a full **2 billion years**, is the age of the microcosm, in which bacteria and other microorganisms invented the basic processes of life and established the **global feedback loops** for the self-regulation of the Gaia system.



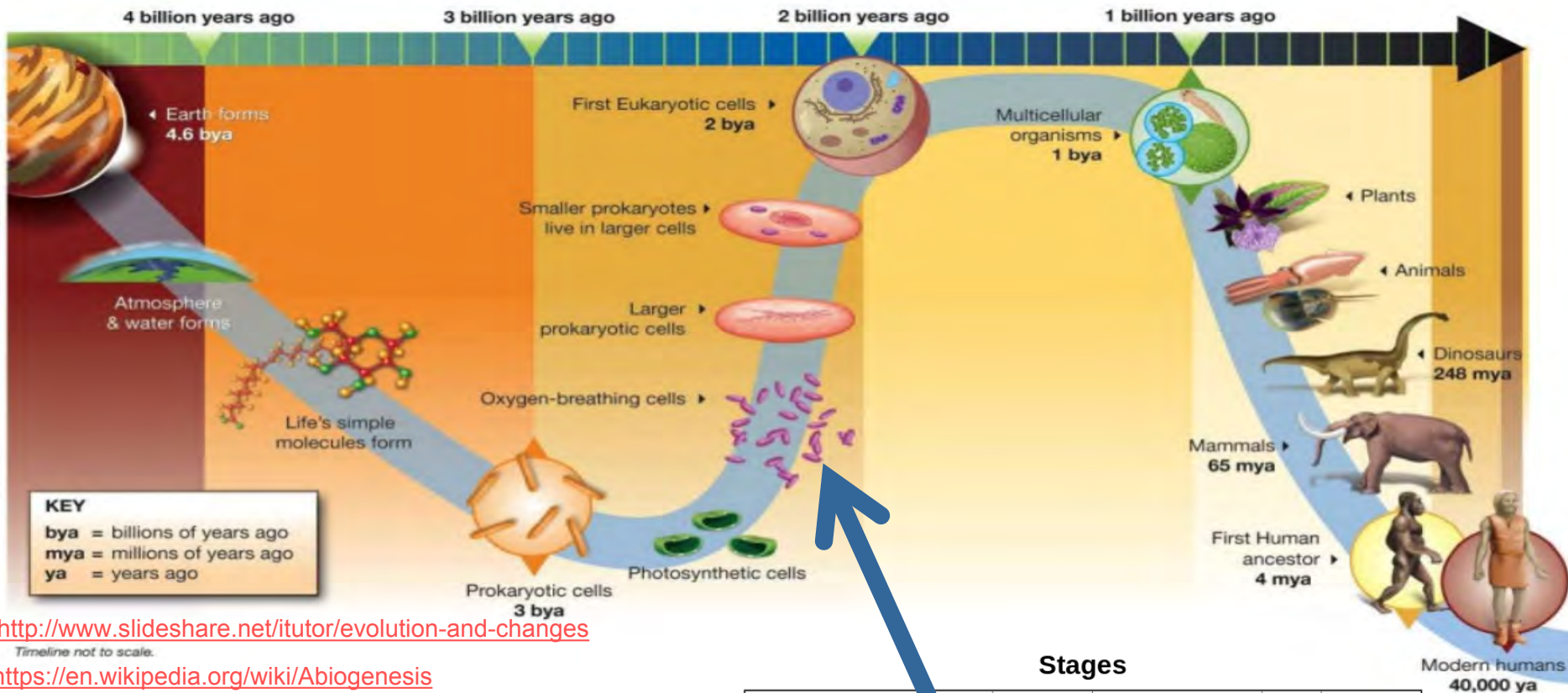


**Vers -2,4 milliards** d'années, grâce aux cyanobactéries photosynthétiques anaérobies, l'oxygène va commencer à se répandre dans l'océan et dans l'atmosphère.



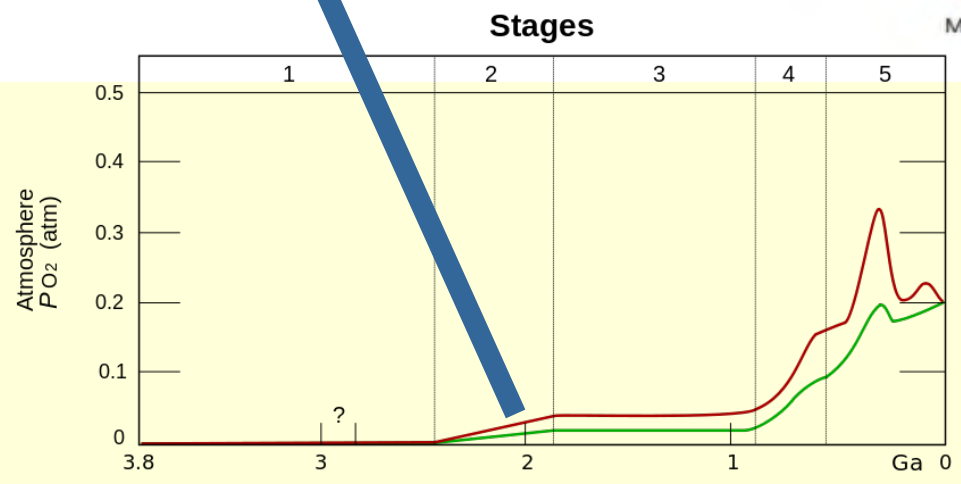
Évolution de la concentration en dioxygène de l'atmosphère terrestre. Limites haute en rouge et basse en vert<sup>1</sup>.

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande\\_Oxydation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_Oxydation)



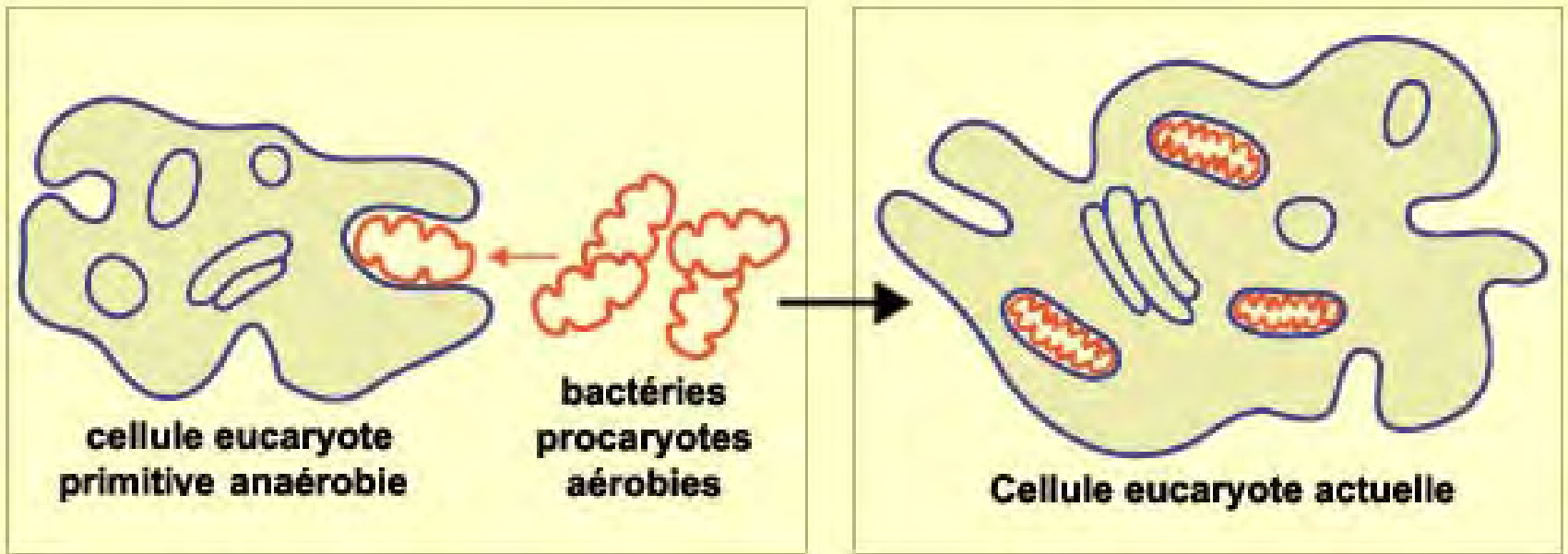
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>  
*Timeline not to scale.*  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

**Vers -2,4 milliards** d'années, grâce aux cyanobactéries photosynthétiques anaérobies, l'oxygène va commencer à se répandre dans l'océan et dans l'atmosphère.



Évolution de la concentration en dioxygène de l'atmosphère terrestre. Limites haute en rouge et basse en vert<sup>1</sup>.

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande\\_Oxydation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_Oxydation)

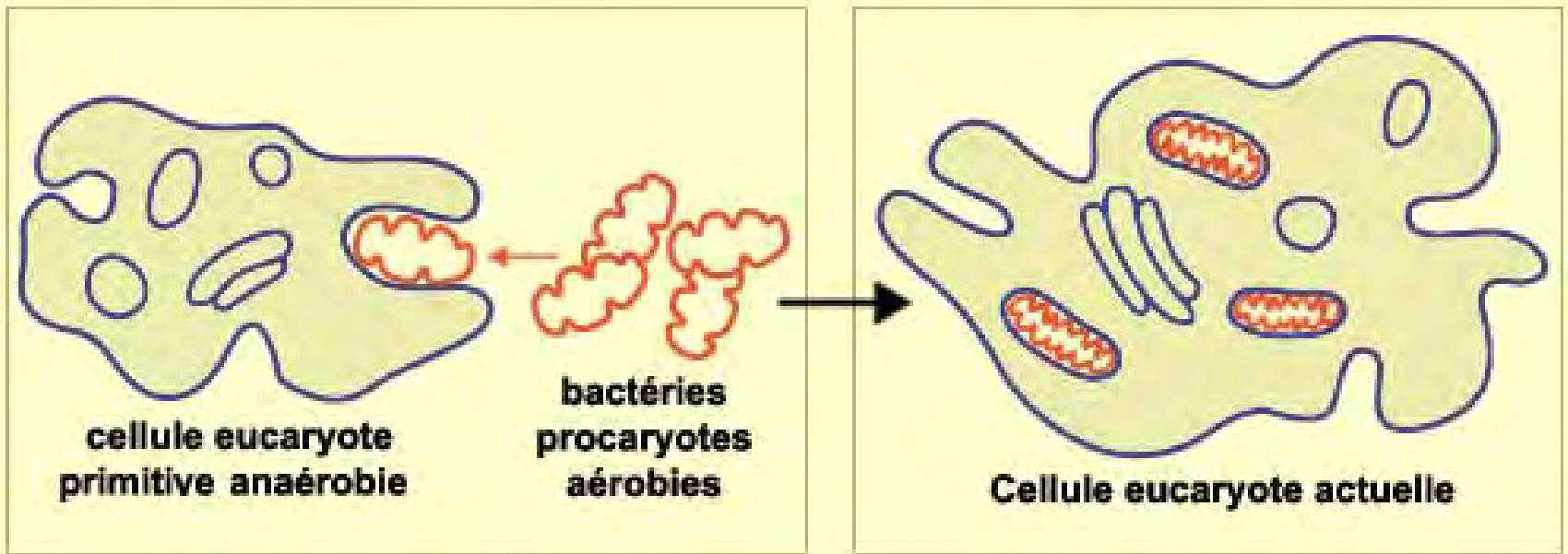


Avant, avec seulement la glycolyse : le **glucose** sera transformé en absence d'oxygène, en alcool éthylique qui sert d'accepteur interne pour les électrons.

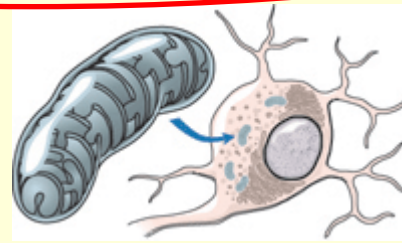
**Bilan énergétique : 2 ATP**

Avec la mitochondrie, la molécule d'oxygène est utilisée comme accepteur final d'électrons et permet une oxydation complète de la molécule de glucose qui sera complètement transformée en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O.

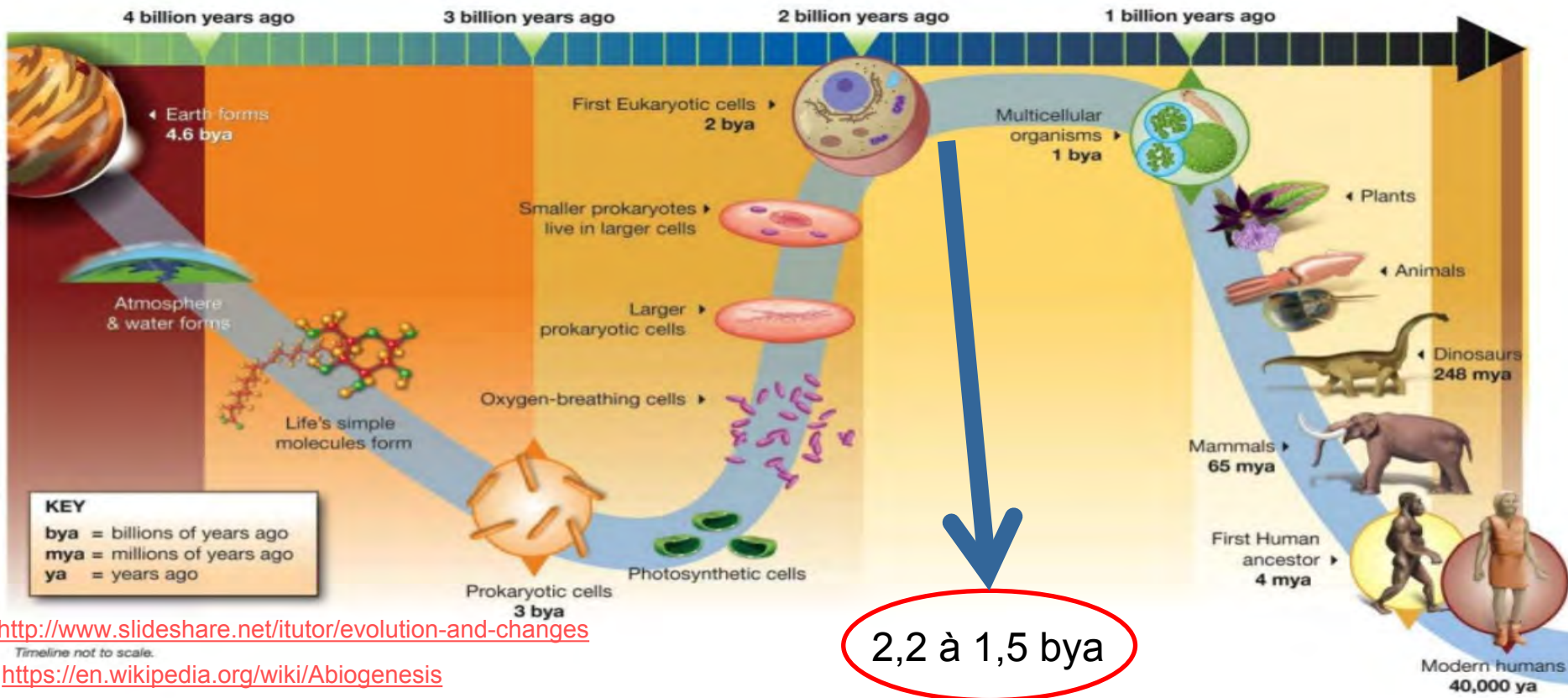
**Bilan énergétique : 38 ATP,**  
soit 19 fois plus que la glycolyse !



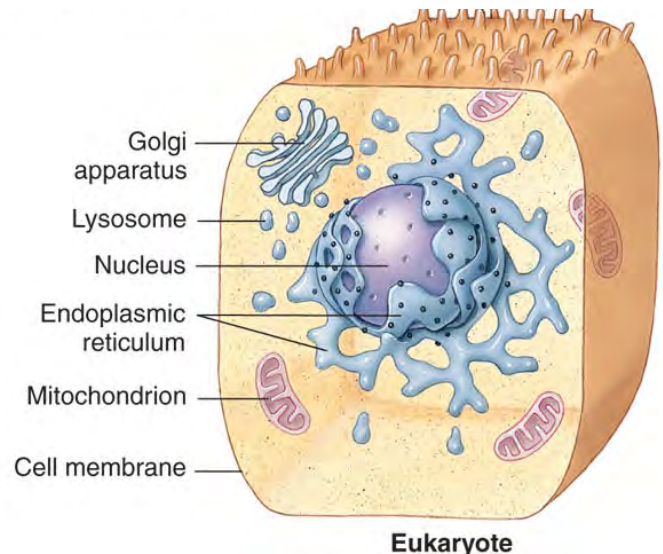
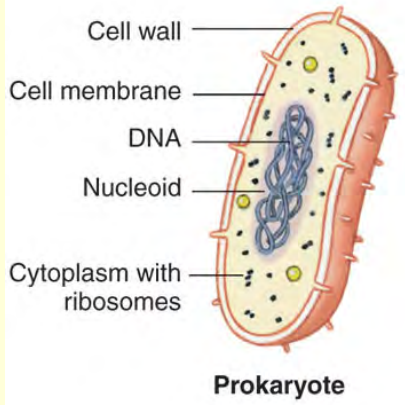
« Pas de relation **symbiotique** cellules eucaryotes - bactéries aérobie  
(une forme de coopération), pas de neurones si énergivores.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »



Car encore aujourd'hui,  
chaque cellule de  
votre cerveau possède  
des mitochondries.



2,2 à 1,5 bya



Quand on considère ces points tournants de l'évolution, il est possible d'imaginer que les choses aient pu se passer autrement, comme disait Gould.

**La photosynthèse et la production d'oxygène** a pu être causé par exemple par des mutations spécifiques qui ont par la suite déterminé la suite de l'évolution, mais ces mutations auraient pu ne pas se produire.

(considérant les combinaisons astronomiques dans les enchaînements d'acides aminés)

“If not, the Earth today might still be peacefully populated by prokaryotes.

Instead, due to a series of fantastic happenstances, we ended up as ourselves.”

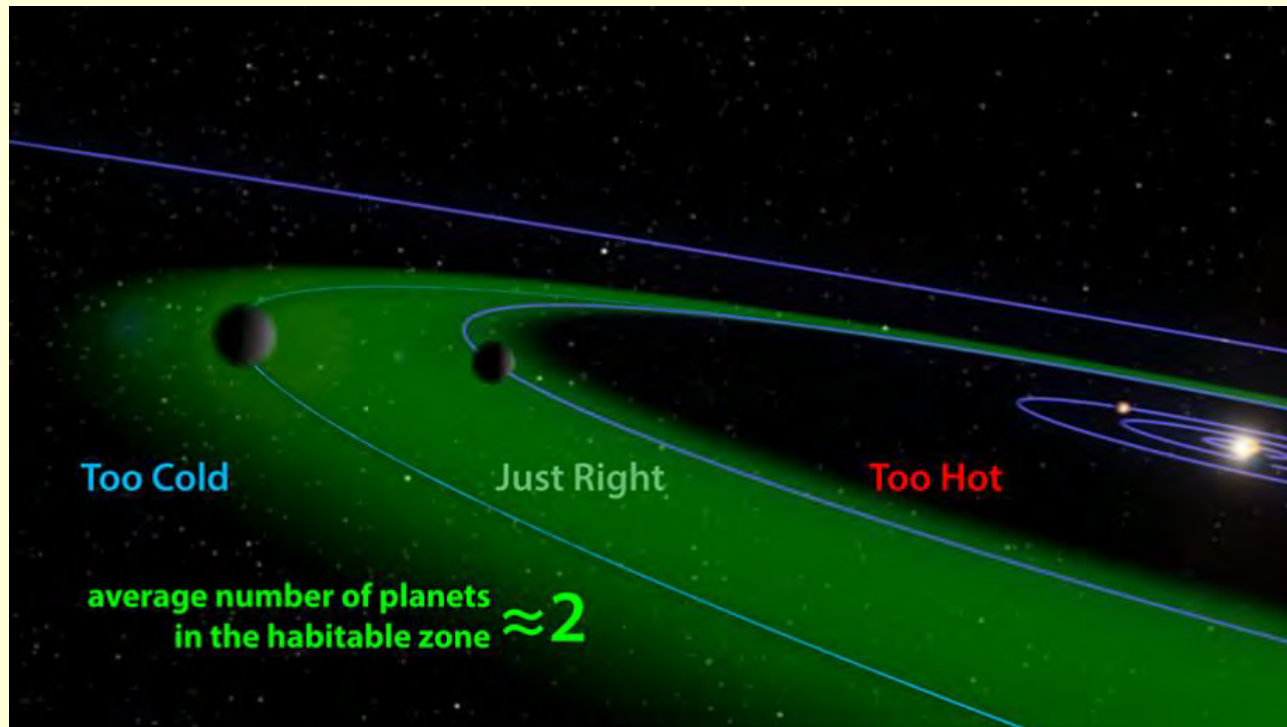
(The System Views of Life)

# Le nombre estimé de planètes « habitables » dans notre galaxie devient vertigineux

Par Erwan Lecomte

Publié le 6 février 2015

Dans une nouvelle publication basée sur les dernières données récoltées par le télescope Kepler, des chercheurs estiment qu'elles **se compteraient en "centaines de milliards"**. C'est bien plus que les dernière estimations.



# The aliens are silent because they're dead

January 21, 2016

<http://phys.org/news/2016-01-aliens-silent-theyre-dead.html>

"The universe is probably filled with **habitable planets**, so many scientists think it should be teeming with aliens," said Dr Aditya Chopra from the ANU Research School of Earth Sciences and lead author on the paper, which is published in *Astrobiology*.

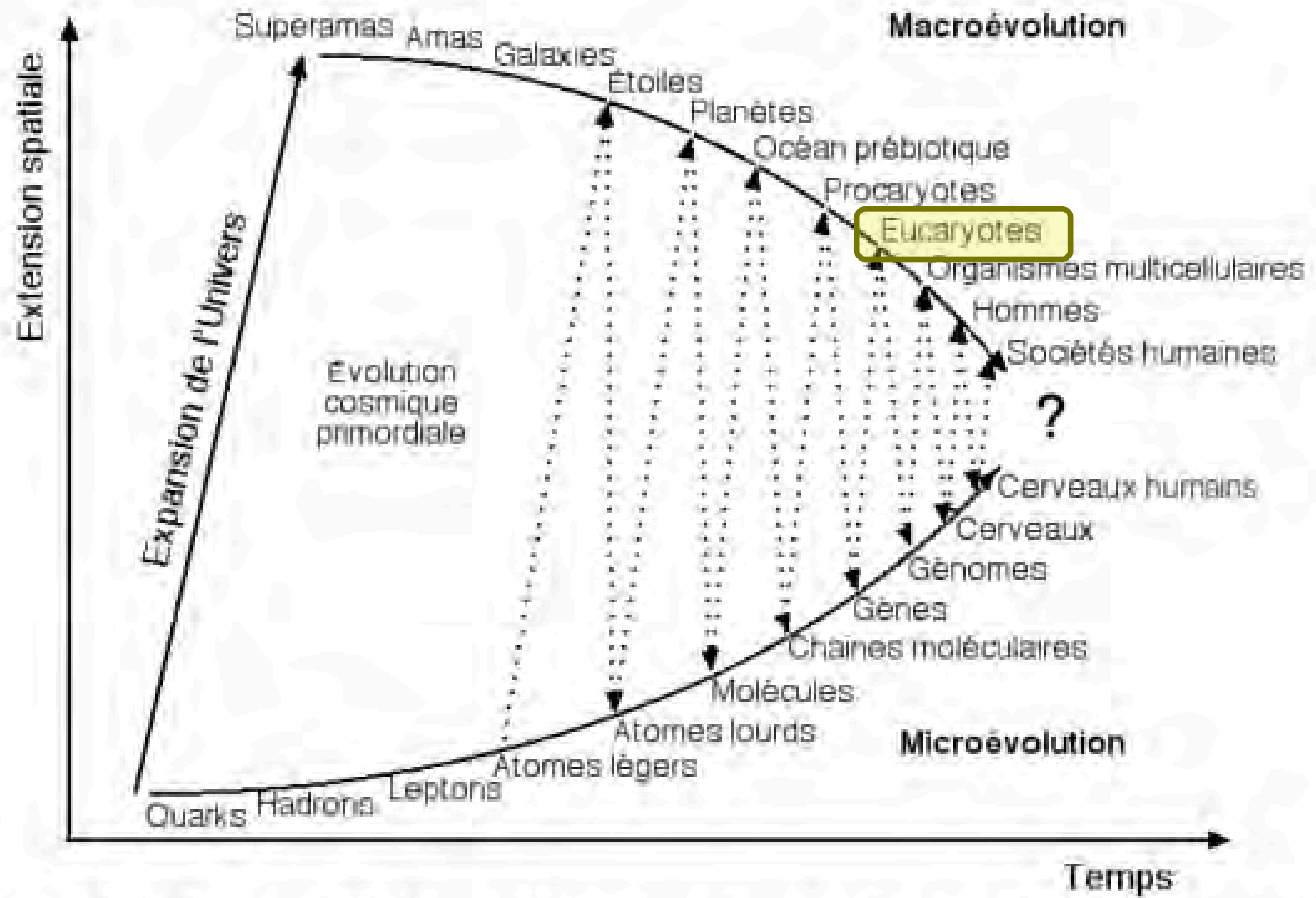
"**Early life is fragile**, so we believe it rarely evolves quickly enough to survive."

"Most early planetary environments are **unstable**.

To produce a habitable planet, life forms need to **regulate greenhouse gases** such as water and carbon dioxide to keep surface temperatures stable."





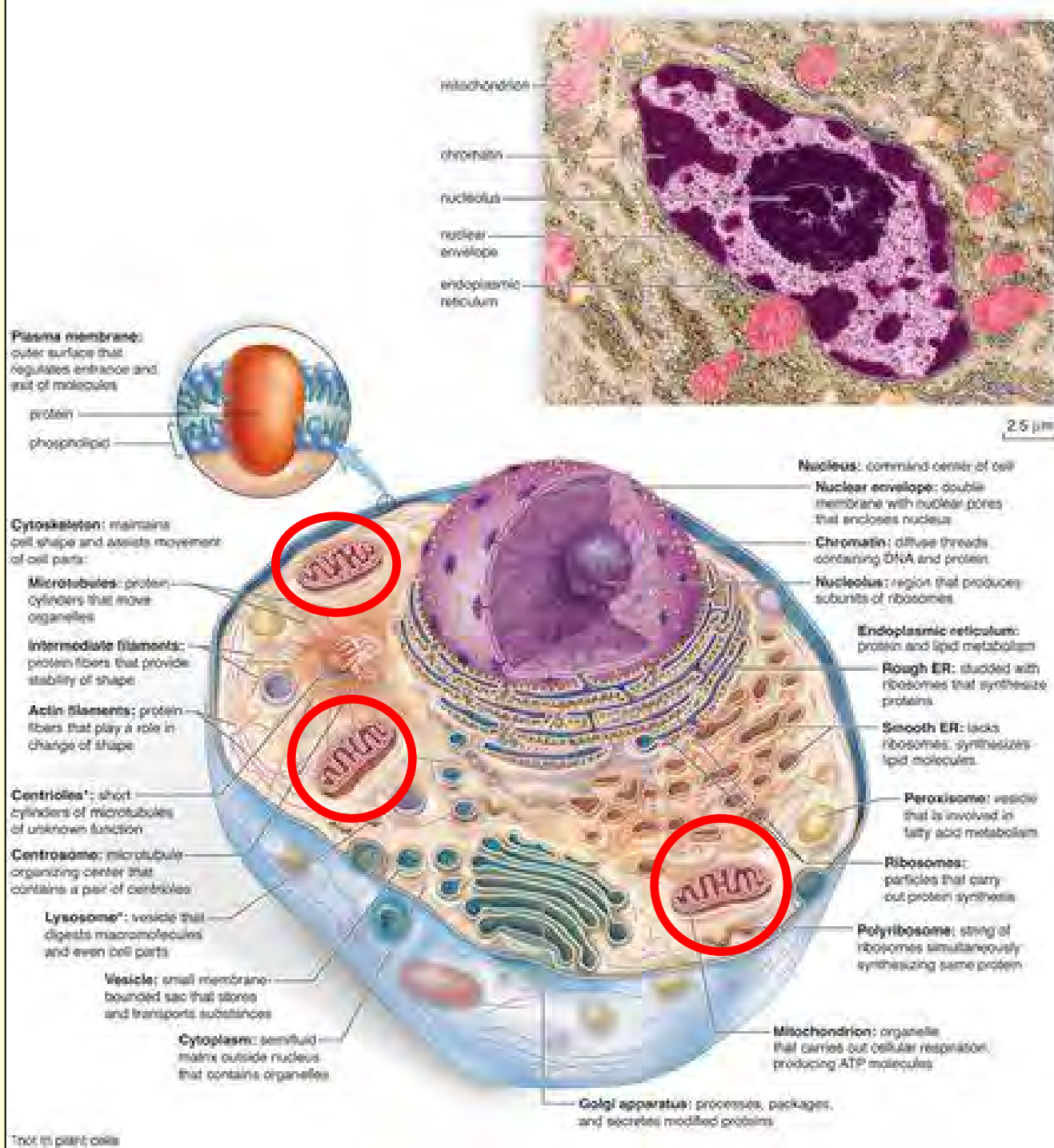


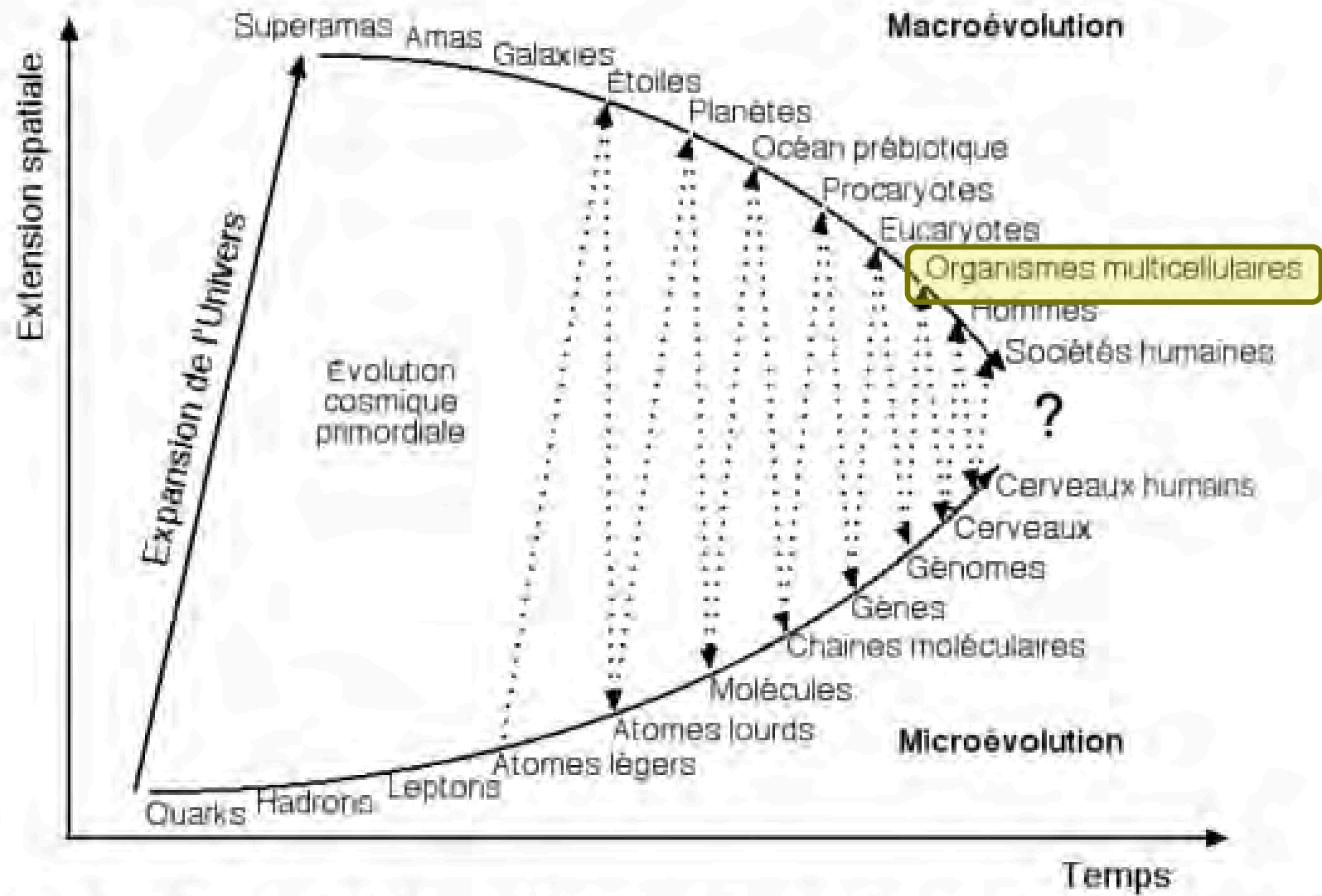
D'après Erich Jantsch, *The self-organizing universe*, Pergamon, 1980.

Les réseaux complexes se « compartimentalisent »

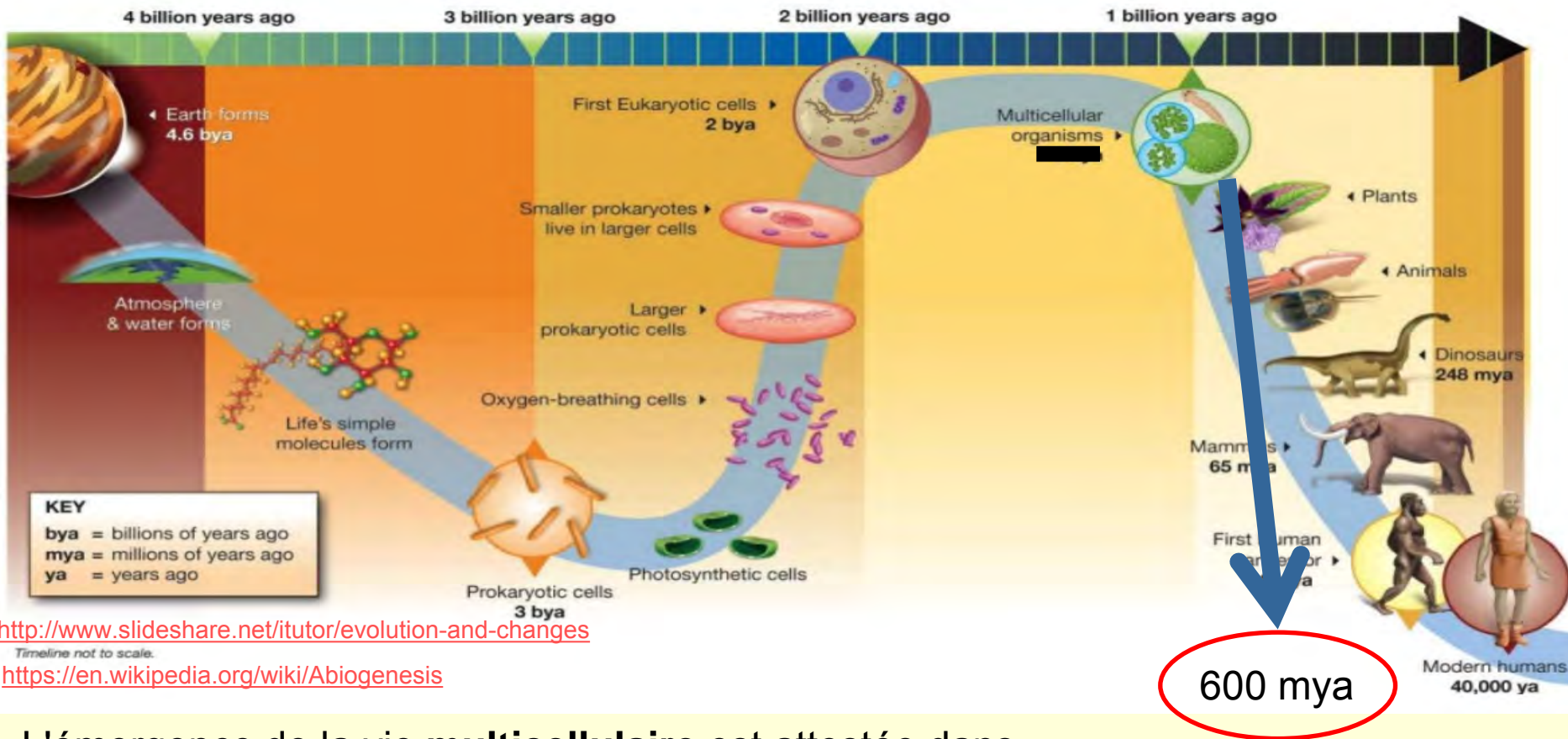
Dans le **noyau**, où se retrouve l'ADN.

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





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



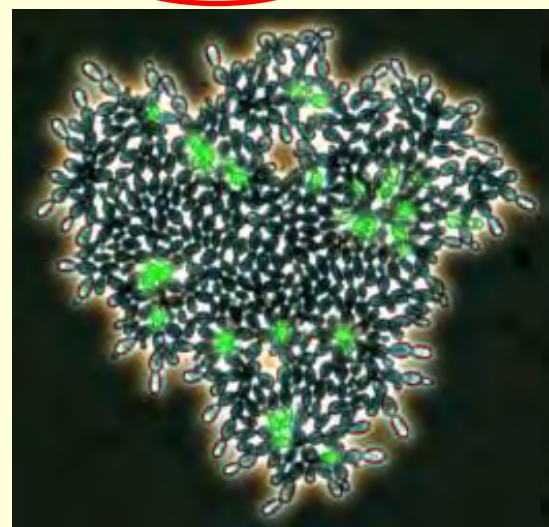
<http://www.slideshare.net/itutor/evolution-and-changes>  
 Timeline not to scale.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Abiogenesis>

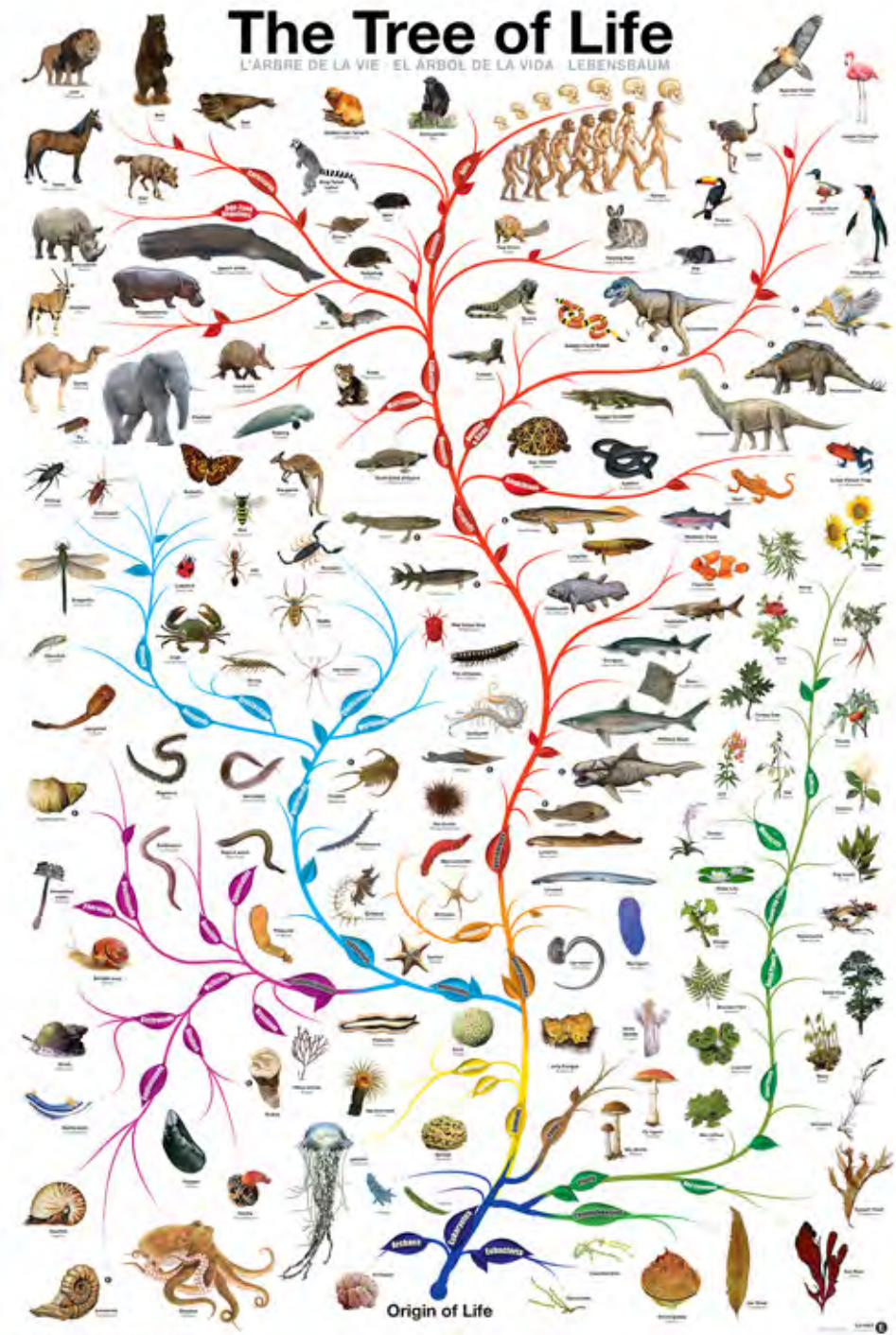
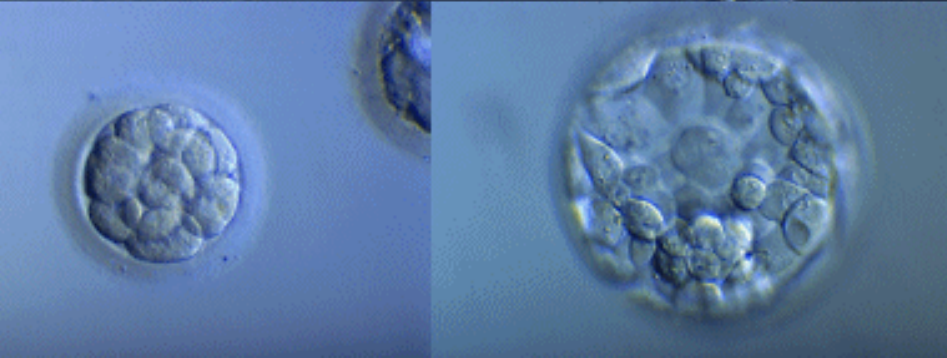
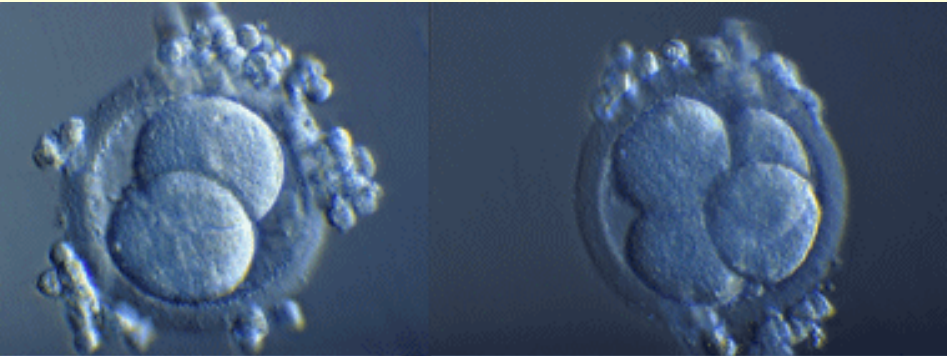
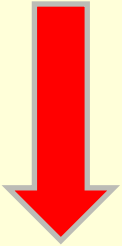
L'émergence de la vie **multicellulaire** est attestée dans des roches datées de 2,1 milliards d'années, mais cette forme de vie disparaît par la suite lors de la « catastrophe de l'oxygène » (avec grande glaciation...).

Elle **réapparaît** véritablement il y a un peu plus de **600 millions d'années**.

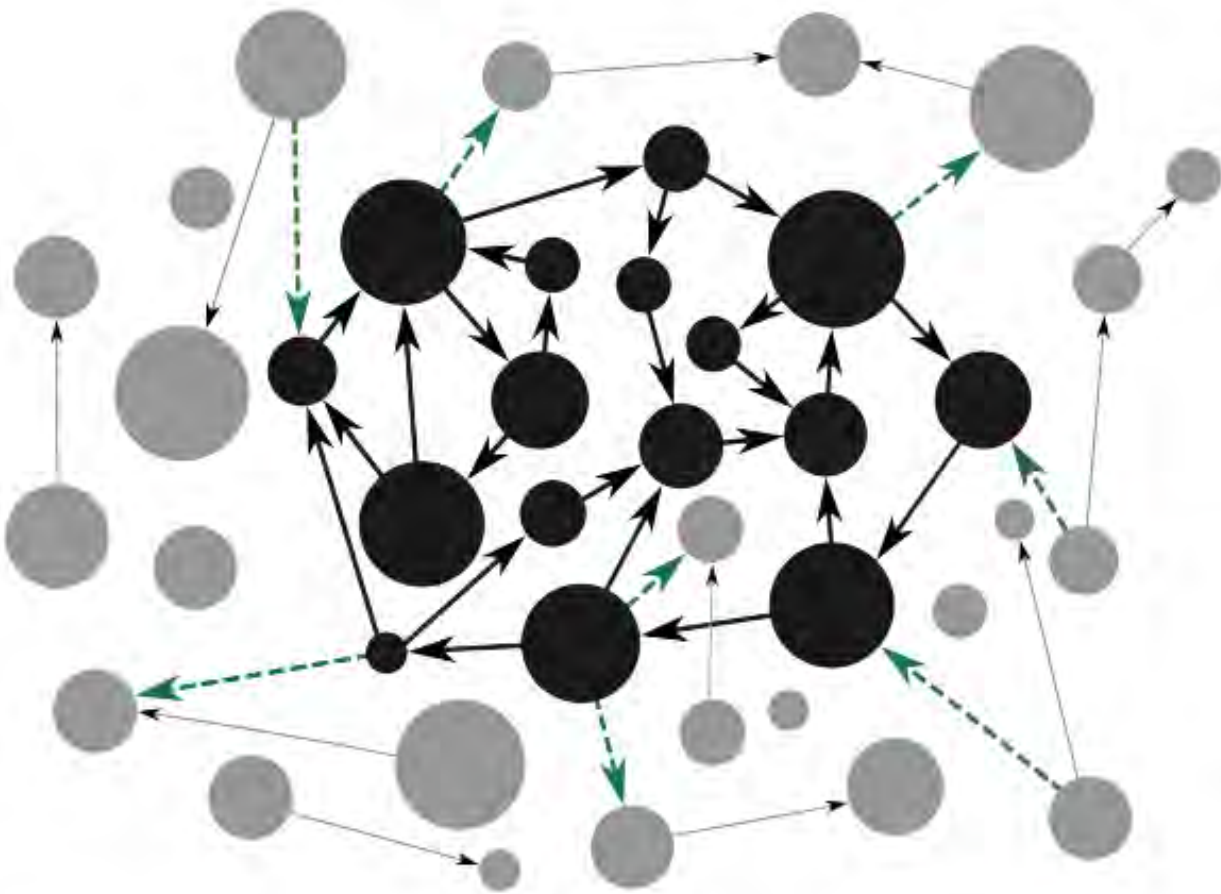
Des multicellulaires **auraient évolué au moins 25 fois** à partir d'ancêtres unicellulaires au cours de l'évolution.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89volution\\_de\\_la\\_multicellularit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89volution_de_la_multicellularit%C3%A9)





En noir : une cellule un organisme

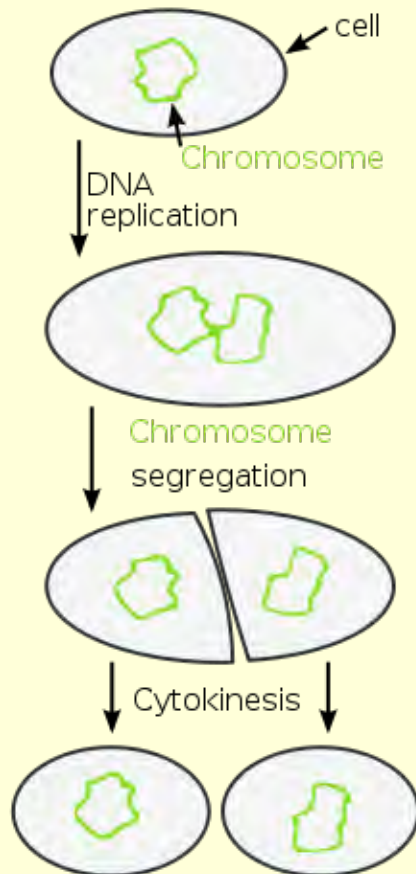


Copyright Ezequiel Di Paolo, 2013. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed\\_en\\_US](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed_en_US)

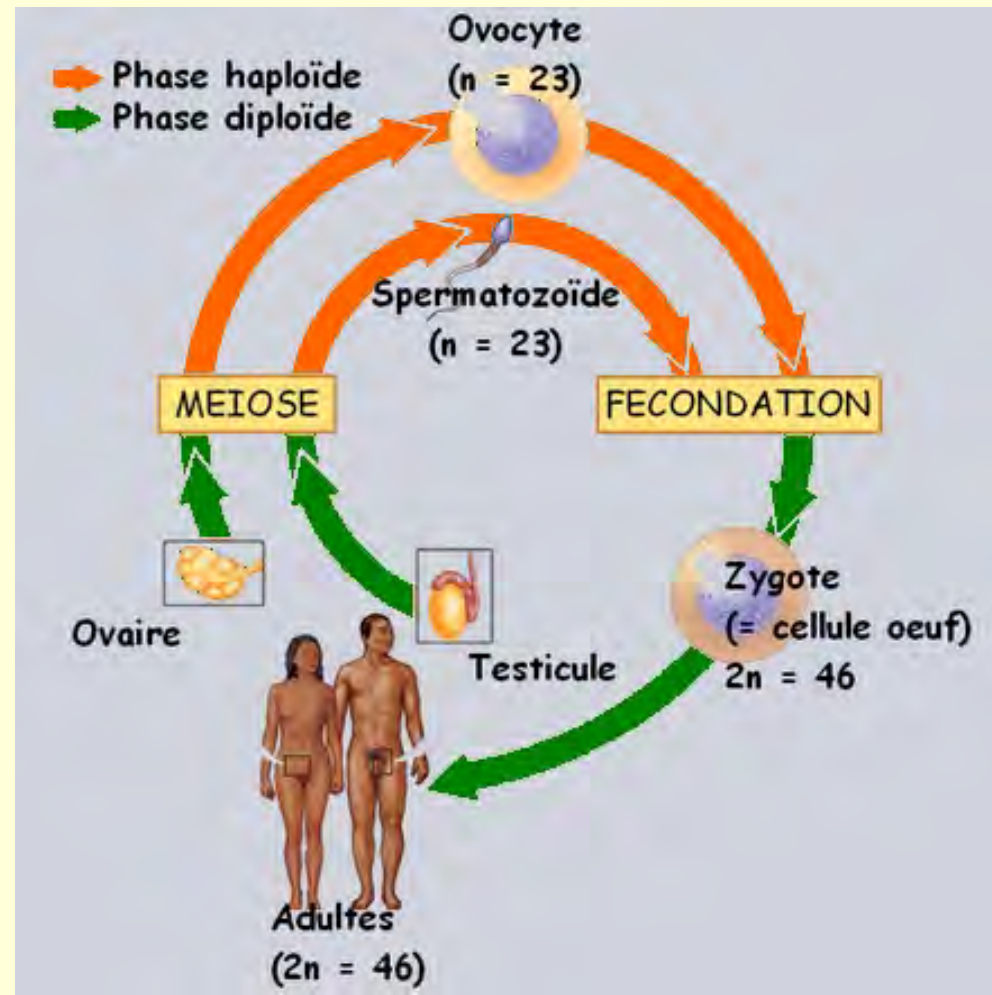


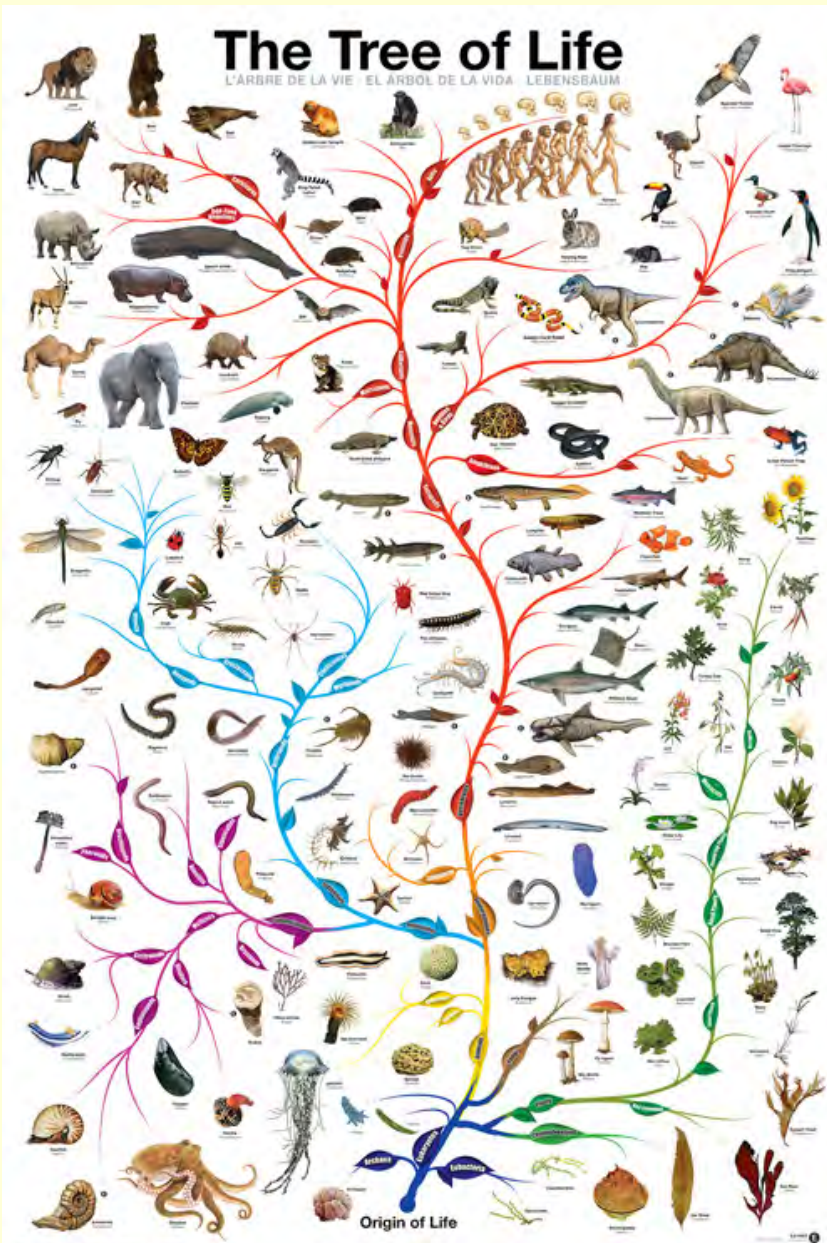
Autre étape importante : apparition de la **reproduction sexuée**, vraisemblablement avec les premiers eucaryotes.

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

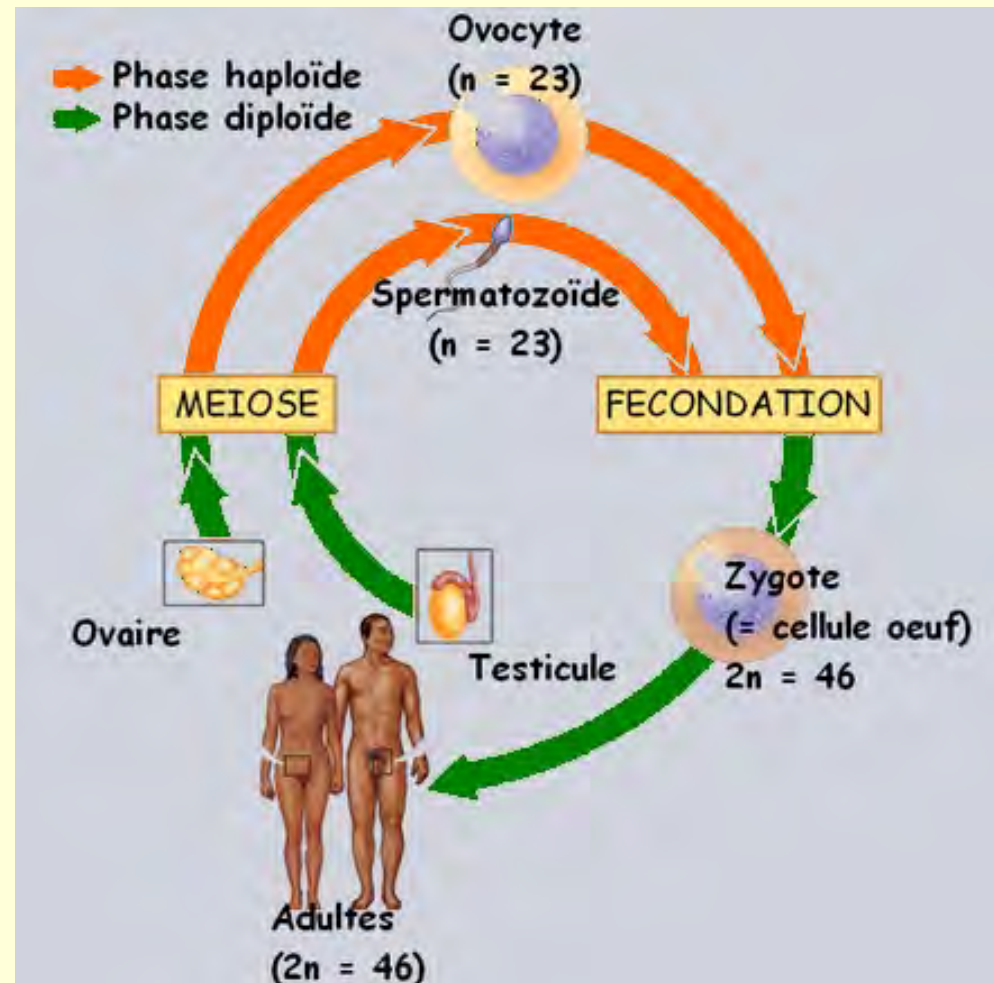


La sexualité : **deux** « parent » se mettent ensemble pour faire **un** individu toujours **différent** grâce au **brassage** du patrimoine génétique (crée beaucoup plus de **diversité**)





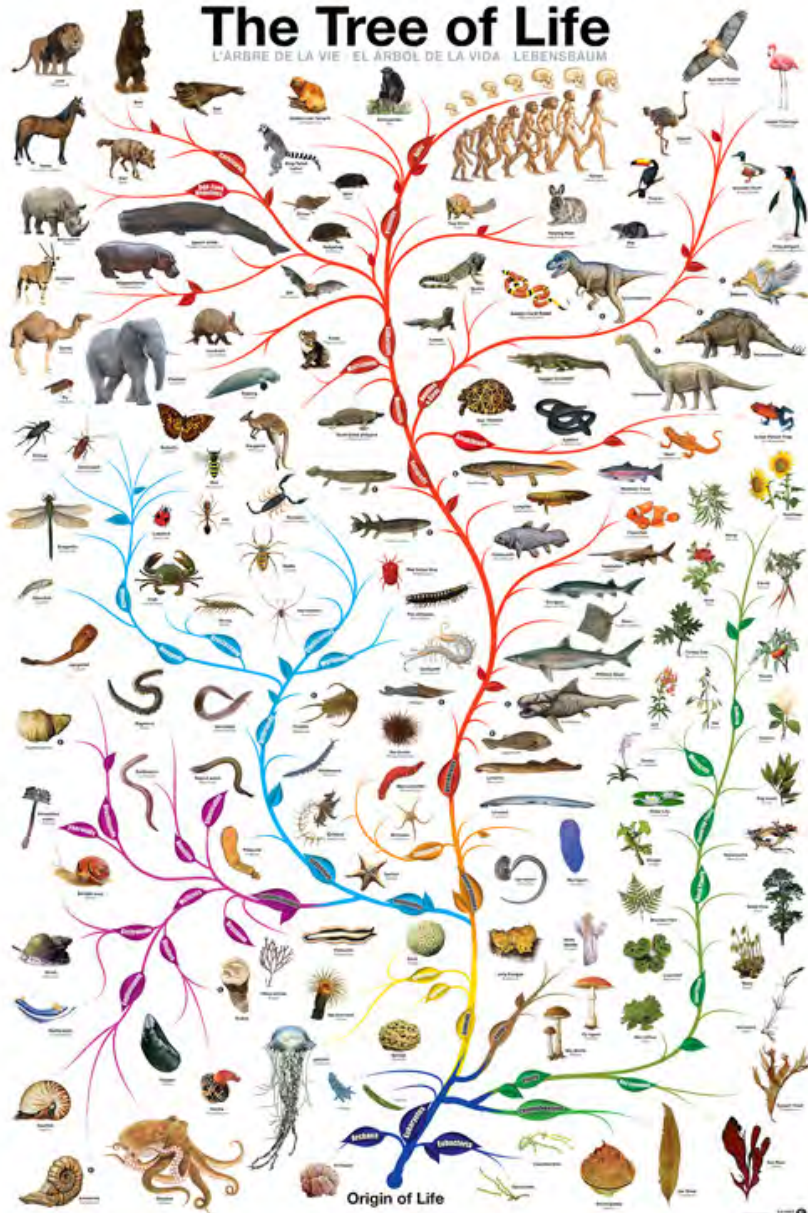
La sexualité : **deux** « parent » se mettent ensemble pour faire **un** individu toujours **différent** grâce au **brassage** du patrimoine génétique (crée beaucoup plus de **diversité**)





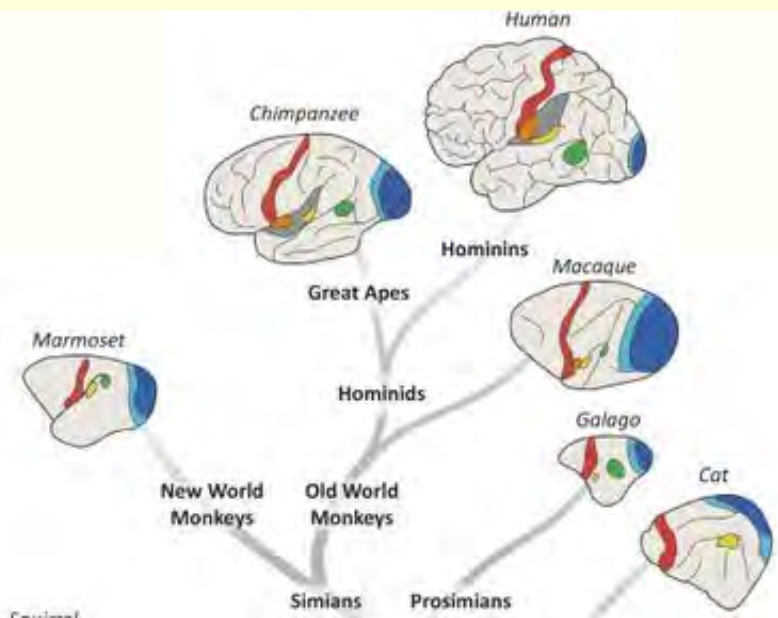
# The Tree of Life

L'ARBRE DE LA VIE · EL ÁRBOL DE LA VIDA · LEBENSBAUM

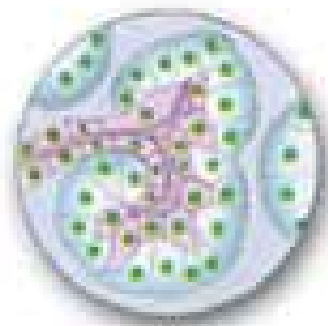


« Pas de sexualité, peu de diversité.  
Peu de diversité, peu d'évolution  
biologique.

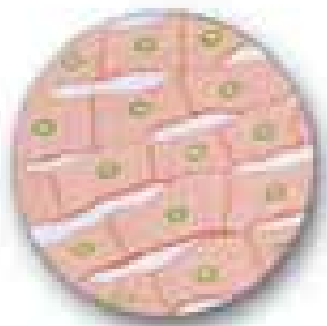
Peu d'évolution biologique,  
peu de chance de produire  
des cerveaux humains ! »



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



cellule  
pancréatique



cellule  
cardiaque



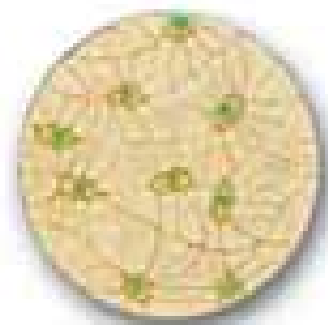
cellule  
sanguine



cellule  
pulmonaire



ovule



cellule  
osseuse



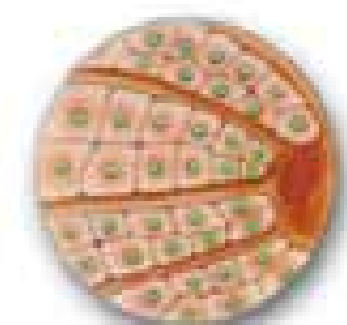
cellule  
de la rate



cellule  
musculaire



cellule  
du cerveau

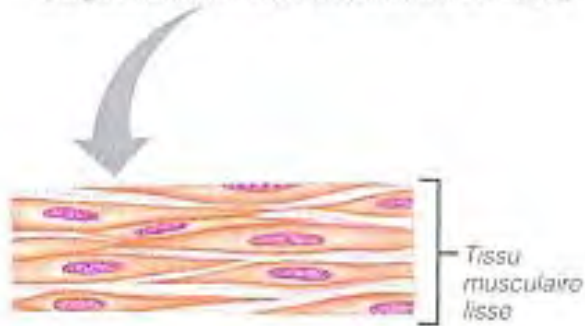


cellule  
du foie

Cellule musculaire lisse



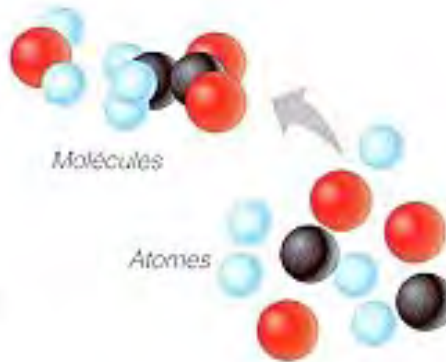
Les cellules sont composées d'organites, eux-mêmes constitués de molécules



Les tissus sont constitués de cellules du même type



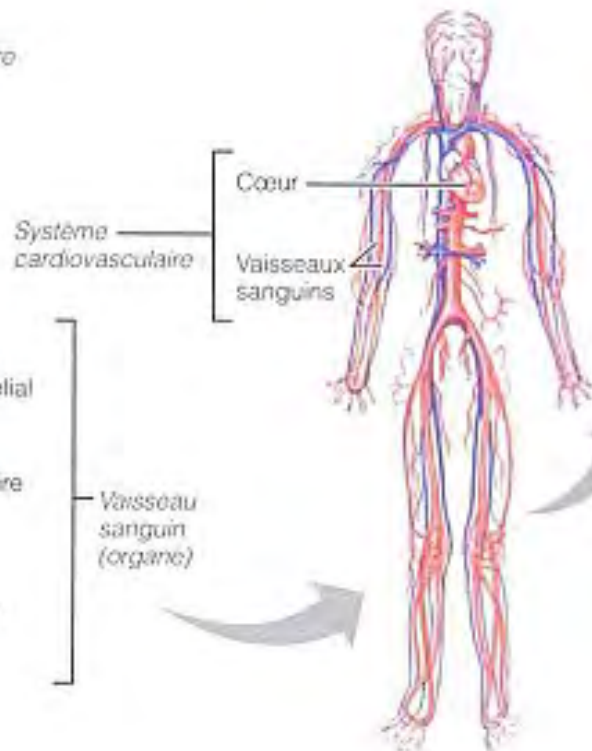
Les organes sont formés de différents types de tissus



Molécules

Atomes

Les atomes se combinent pour former des molécules

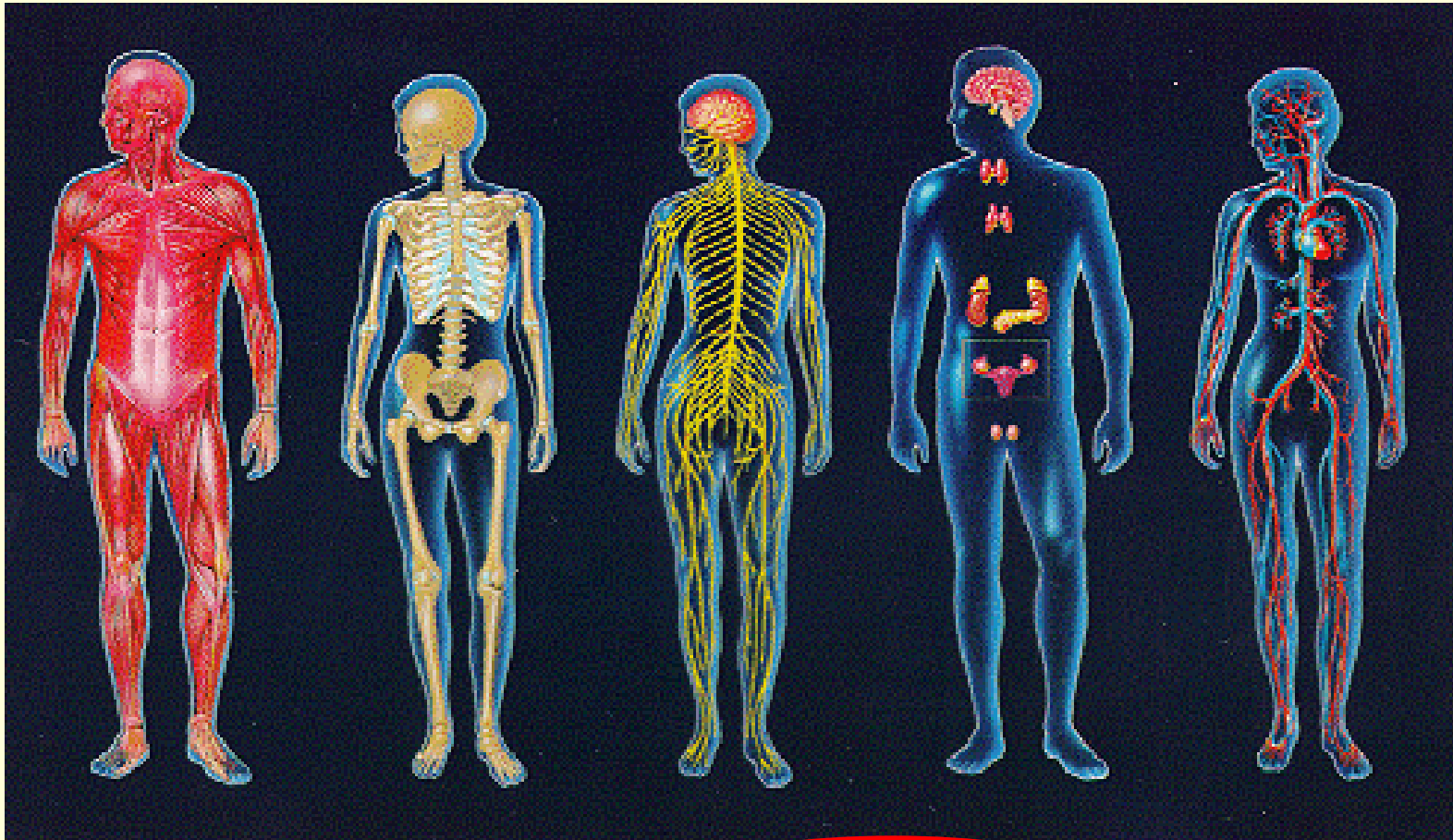


Les systèmes sont constitués de divers organes qui interagissent



L'organisme est formé de l'ensemble de ses systèmes

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

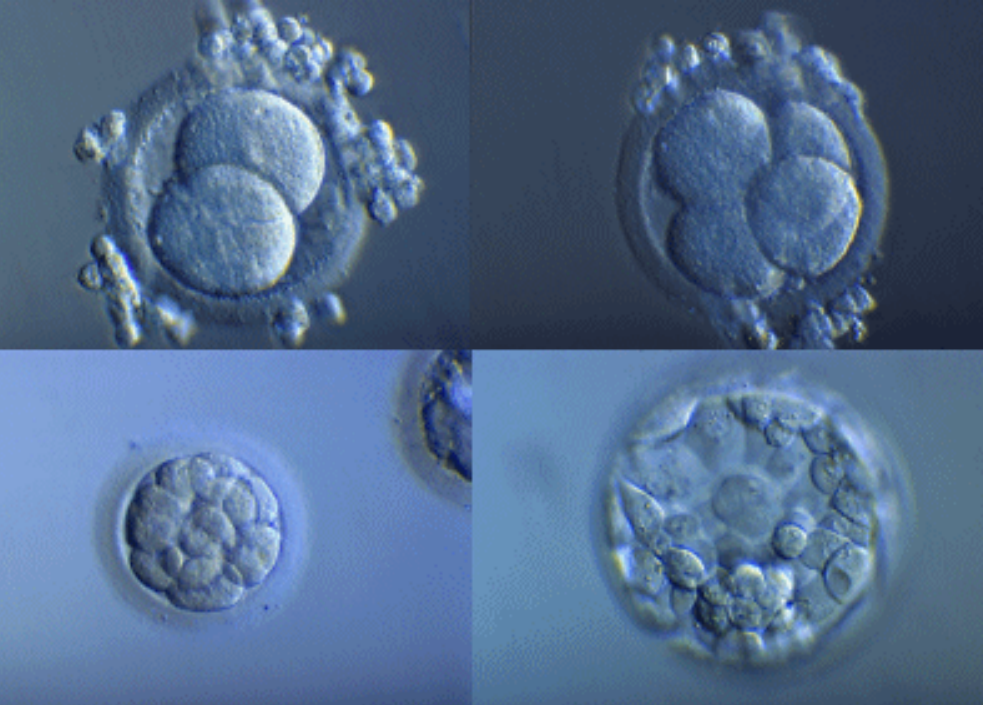


Musculo-squelettique

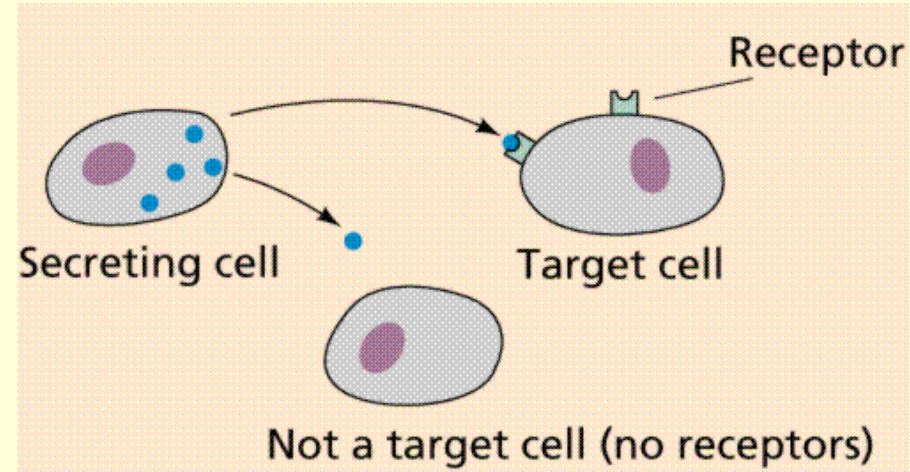
Nerveux

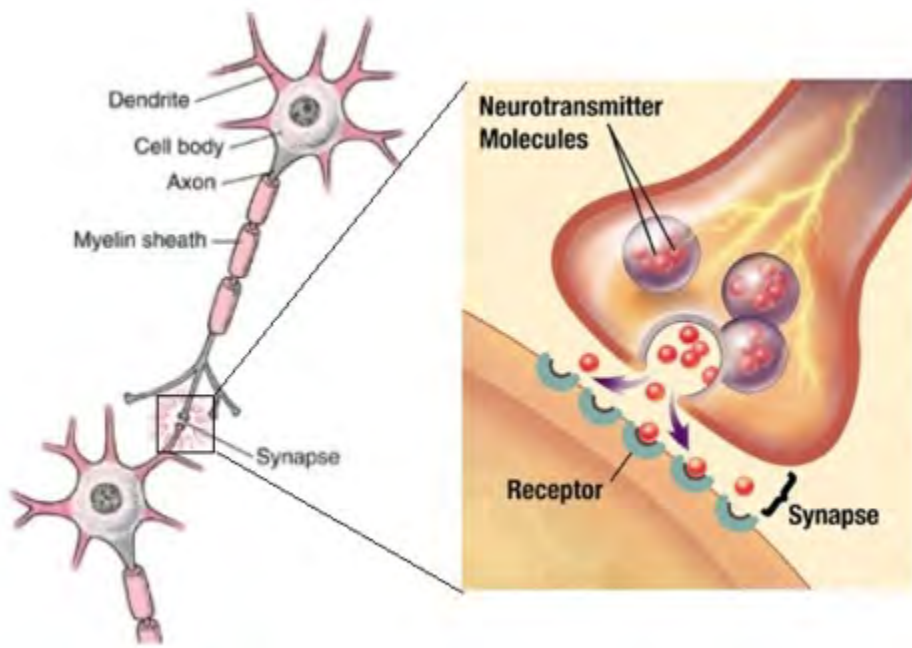
Endocrinien

Circulatoire

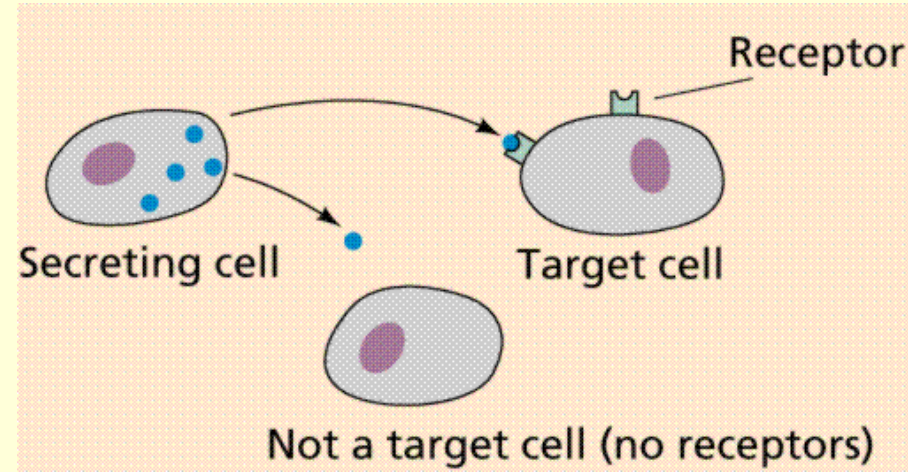


...dont l'origine est très ancienne !

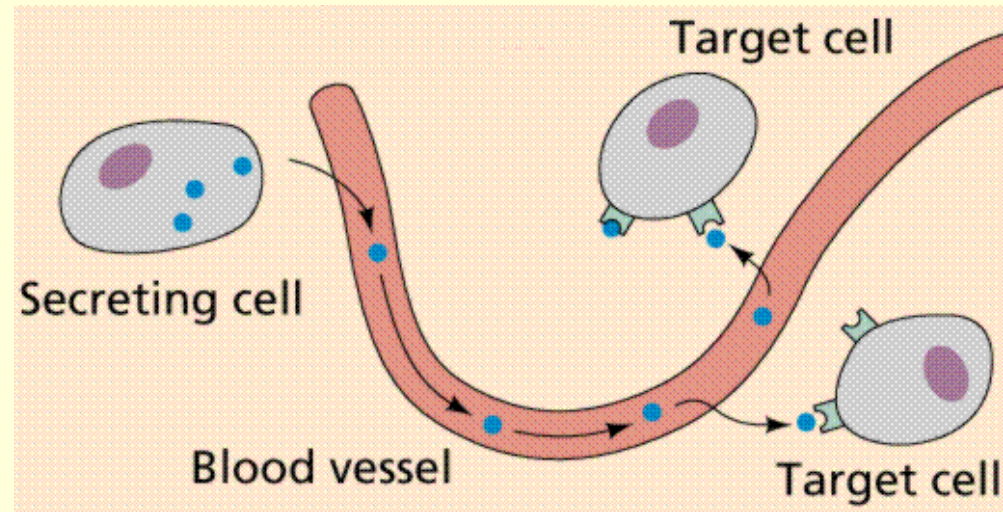




...mais aussi neurotransmetteurs et récepteur des neurones du **système nerveux !**

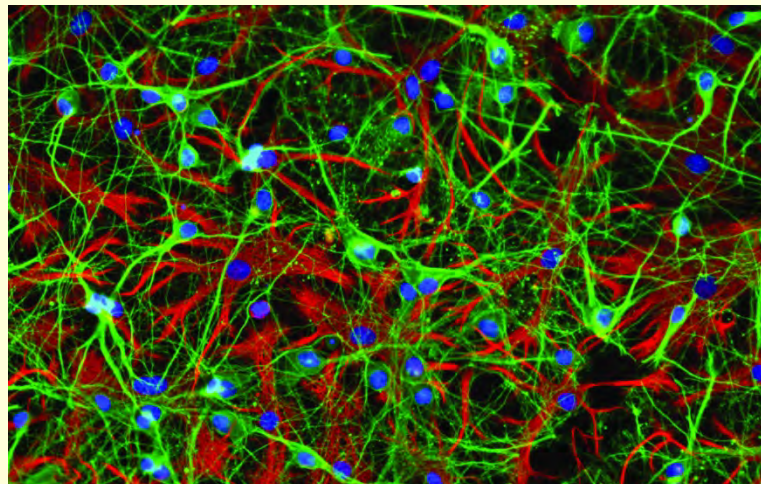


**Hormones !**  
(système endocrinien)

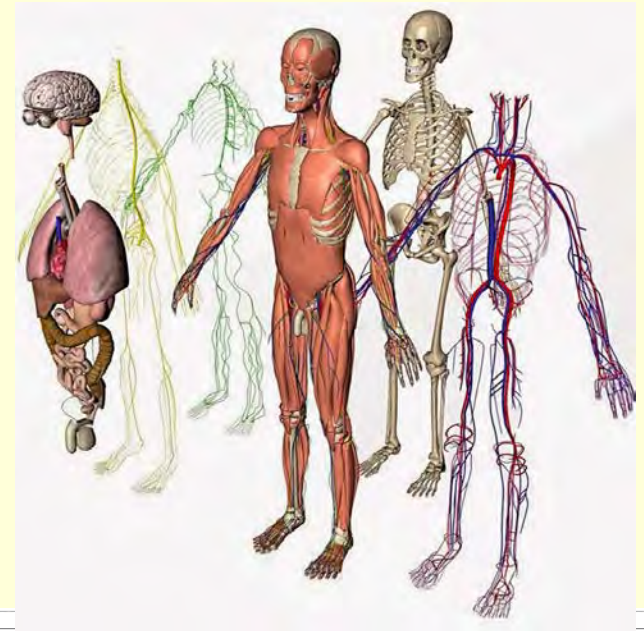


« Pas de multicellulaires, pas de cellules spécialisées.  
Pas de cellules spécialisées, pas de neurones.  
Pas de neurones, pas de cerveaux.  
Pas de cerveaux, pas d'humains ! »

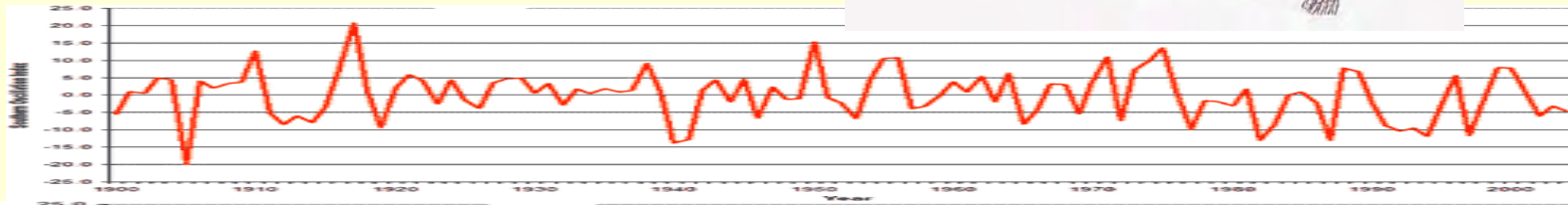
Car encore aujourd'hui,  
toute la puissance computationnelle de  
notre cerveau vient du travail coordonné  
de ses milliards de cellules spécialisées.



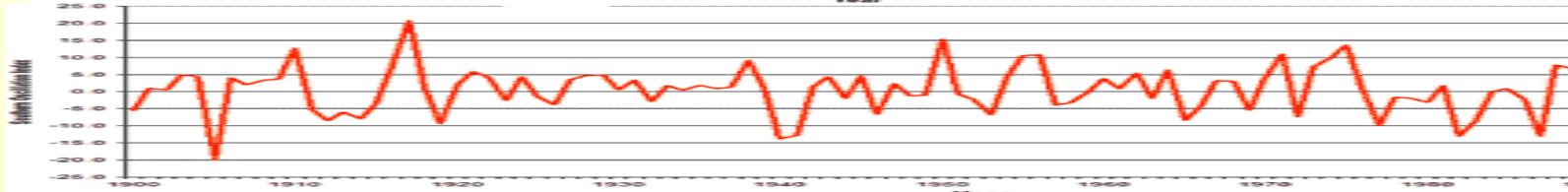
L'autopoïèse trouve donc un écho à l'échelle des organismes multicellulaire avec ce qu'on appelle les « **besoins fondamentaux** » qui oscillent autour d'une valeur optimale vers laquelle les différents systèmes de l'organisme vont tendre à les maintenir.



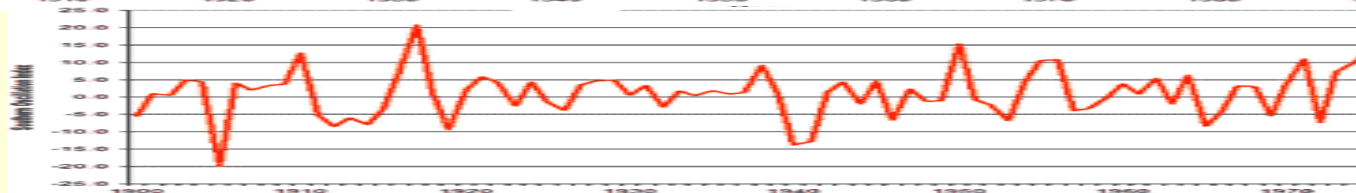
**FAIM**



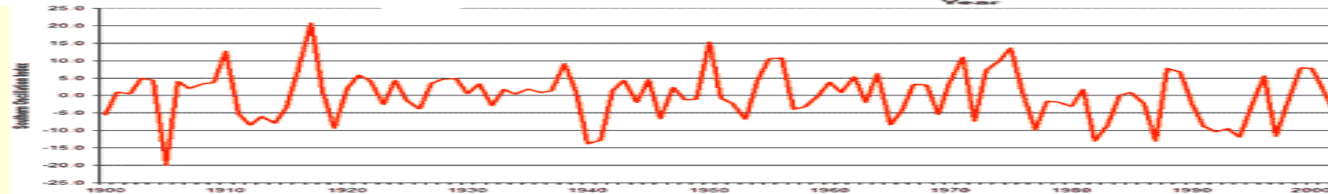
**SOIF**



**TEMPÉRATURE**



**REPRODUCTION**





« The physiology of biological systems can be reduced almost entirely to their **homeostasis** ».

- Karl Friston (2010)

## De l'homéostasie

Par ETHUS, 1 octobre 2010

<http://www.leconflit.com/article-de-l-homeostasie-58061784.html>

**Claude BERNARD** (1813-1878), en **1865** (Introduction à l'étude de la médecine expérimentale) crée le concept de milieu intérieur et d'équilibre à l'intérieur de celui-ci :

"Tous les mécanismes vitaux, quelques variés qu'ils soient, n'ont toujours qu'un but, celui de **maintenir l'unité des conditions de la vie dans le milieu intérieur**"

**Walter Bradford CANNON** (1871-1945), forge le mot homéostasie à partir des deux mots grecs stasis (état, position) et homolos (égal, semblable à) en **1926** (The Wisdom of the Body) :

"Les êtres vivants supérieurs constituent un système ouvert présentant de nombreuses relations avec l'environnement.

Les modifications de l'environnement déclenchent des réactions dans le système ou l'affectent directement, aboutissant à des perturbations internes du système.

De telles perturbations sont normalement **maintenues dans des limites étroites** parce que des ajustements automatiques à l'intérieur du système, entrent en action et que de cette façon sont évitées des oscillations amples, les conditions internes étant maintenues à peu près constantes (...).

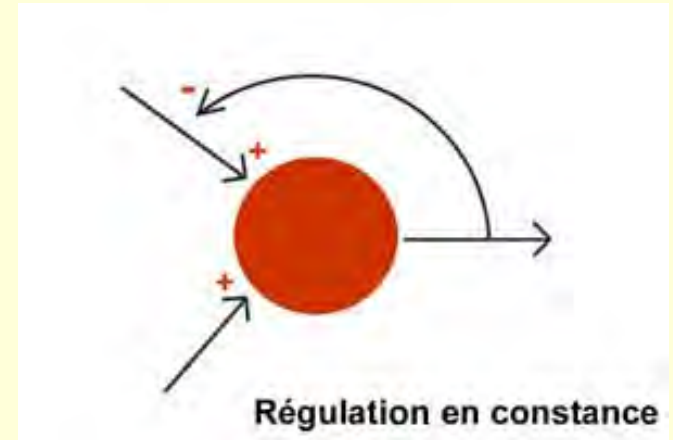
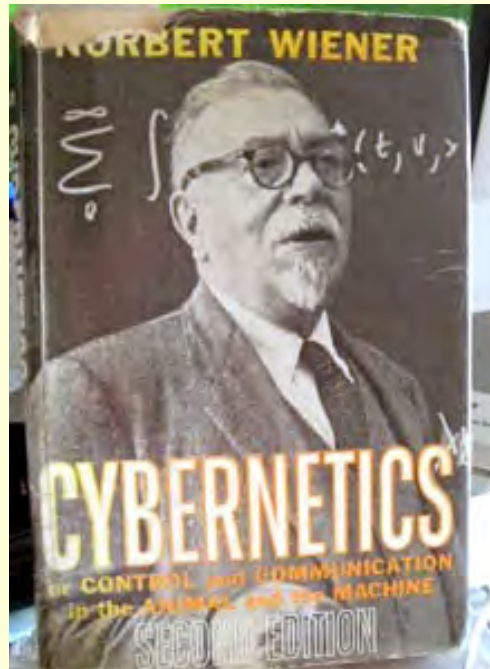
Les réactions physiologiques coordonnées qui maintiennent la plupart des équilibres dynamiques du corps sont si complexes et si particulières aux organismes vivants qu'il a été suggéré qu'une désignation particulière soit employée pour ces réactions : celle **d'homéostasie**".

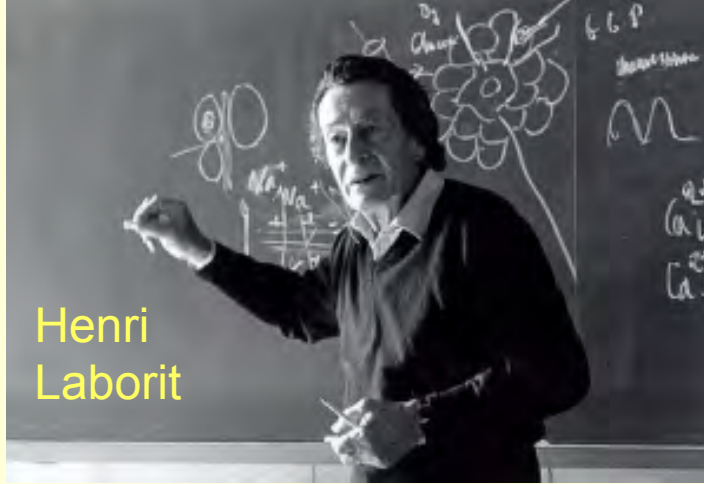
- concept étendu par **Norbert WIENER** (1894-1964) et William Ross ASHBY dans le cadre de la **cybernétique**

avec l'idée **de pilotage par rétroaction**  
ou « **d'action finalisée** »

En anglais, on parle de :

**feedback,**  
**closed loop,**  
**control mechanism**





Henri Laborit

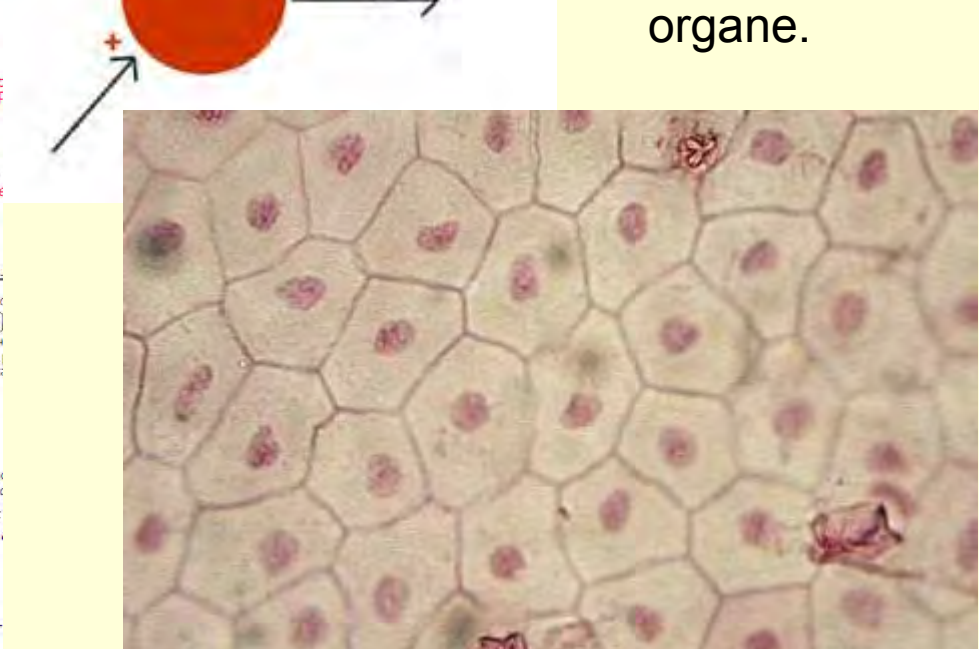
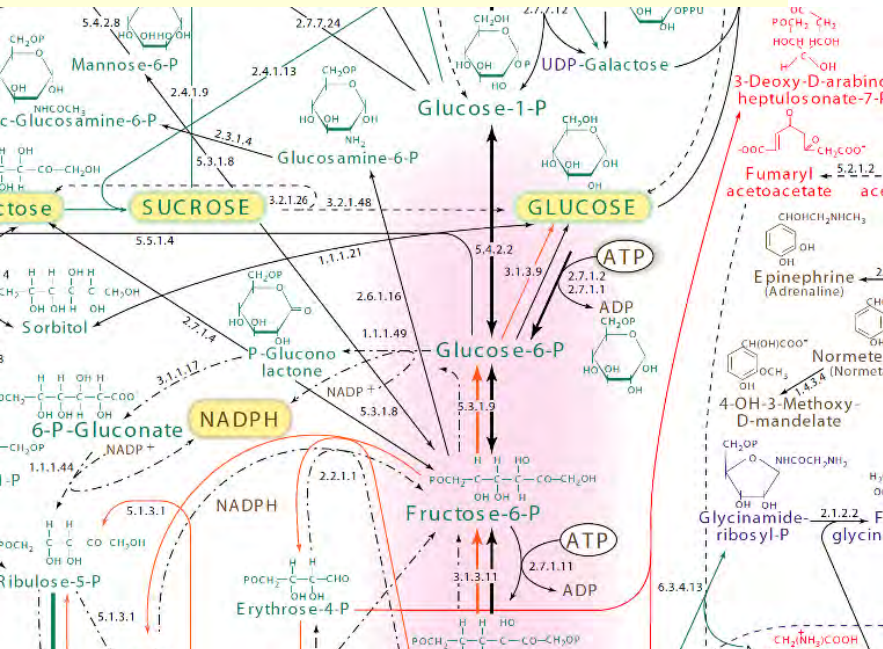


Hans Selye

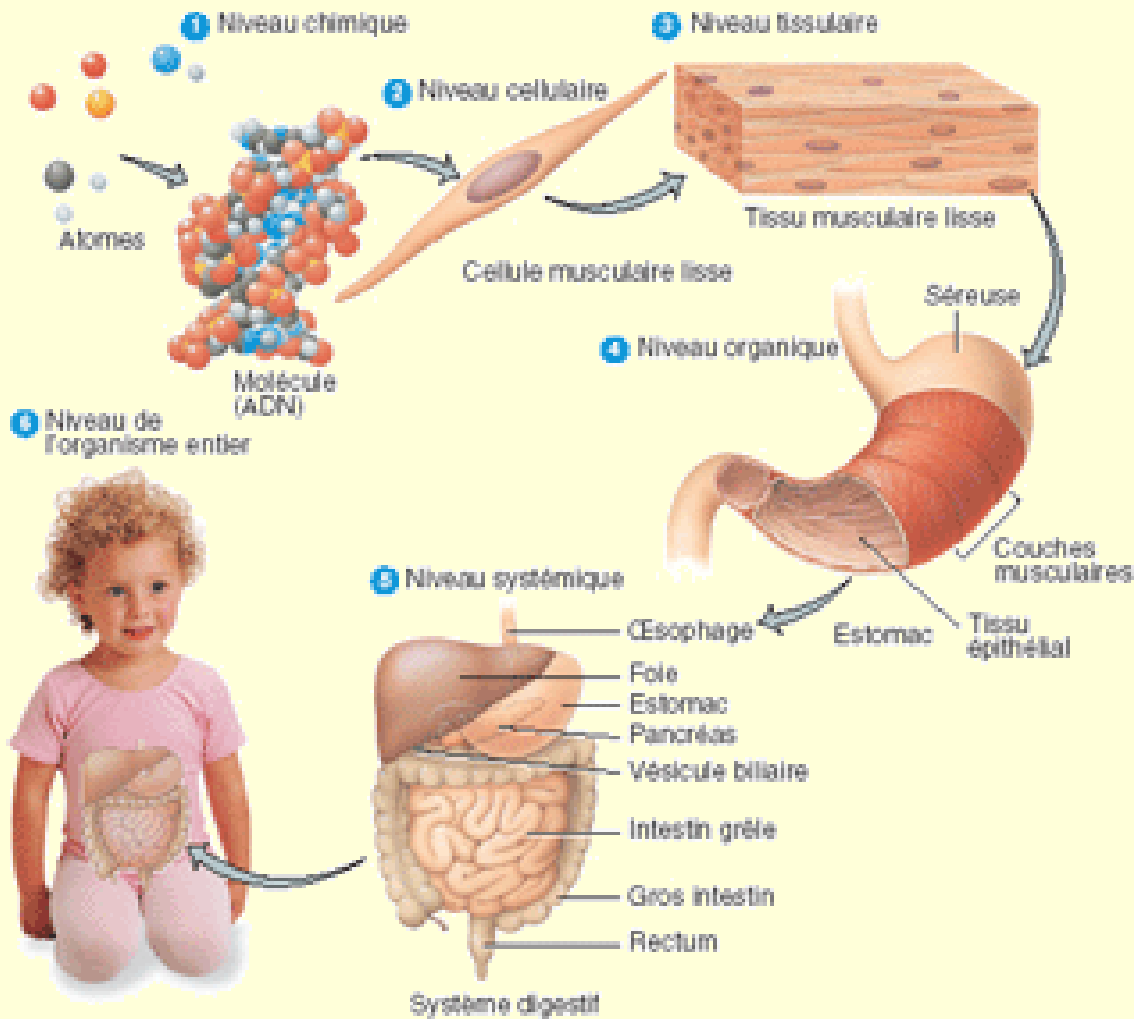
Comme je le mentionnais la séance passée, des biologistes se mettent à trouver des **systèmes régulés par boucle de rétroaction** tant dans les voies métaboliques...



...qu'entre les cellules d'un organe.



## Organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)

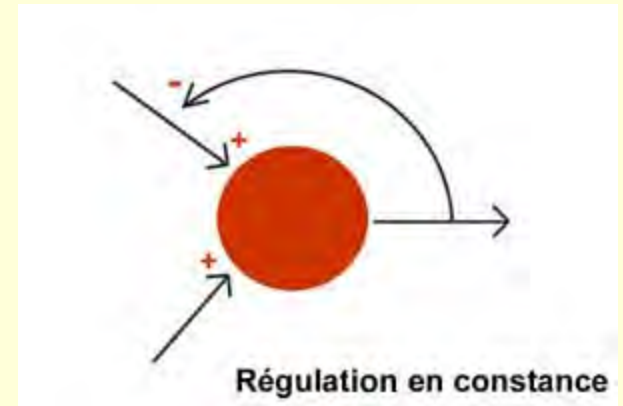
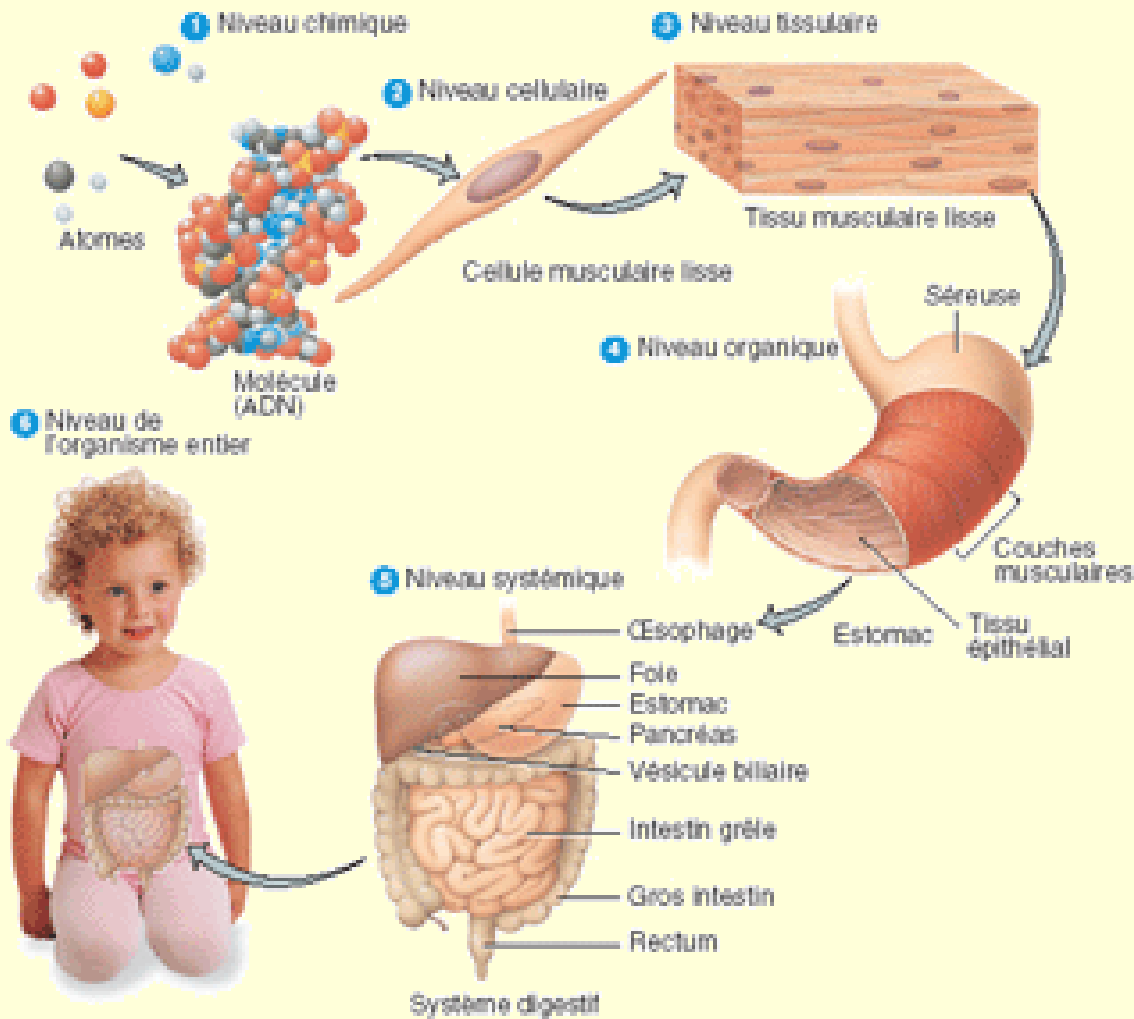


Car dans un organisme, chacun de ces « **niveaux d'organisation** » **doit collaborer** pour maintenir l'homéostasie de l'ensemble.

Comment ?

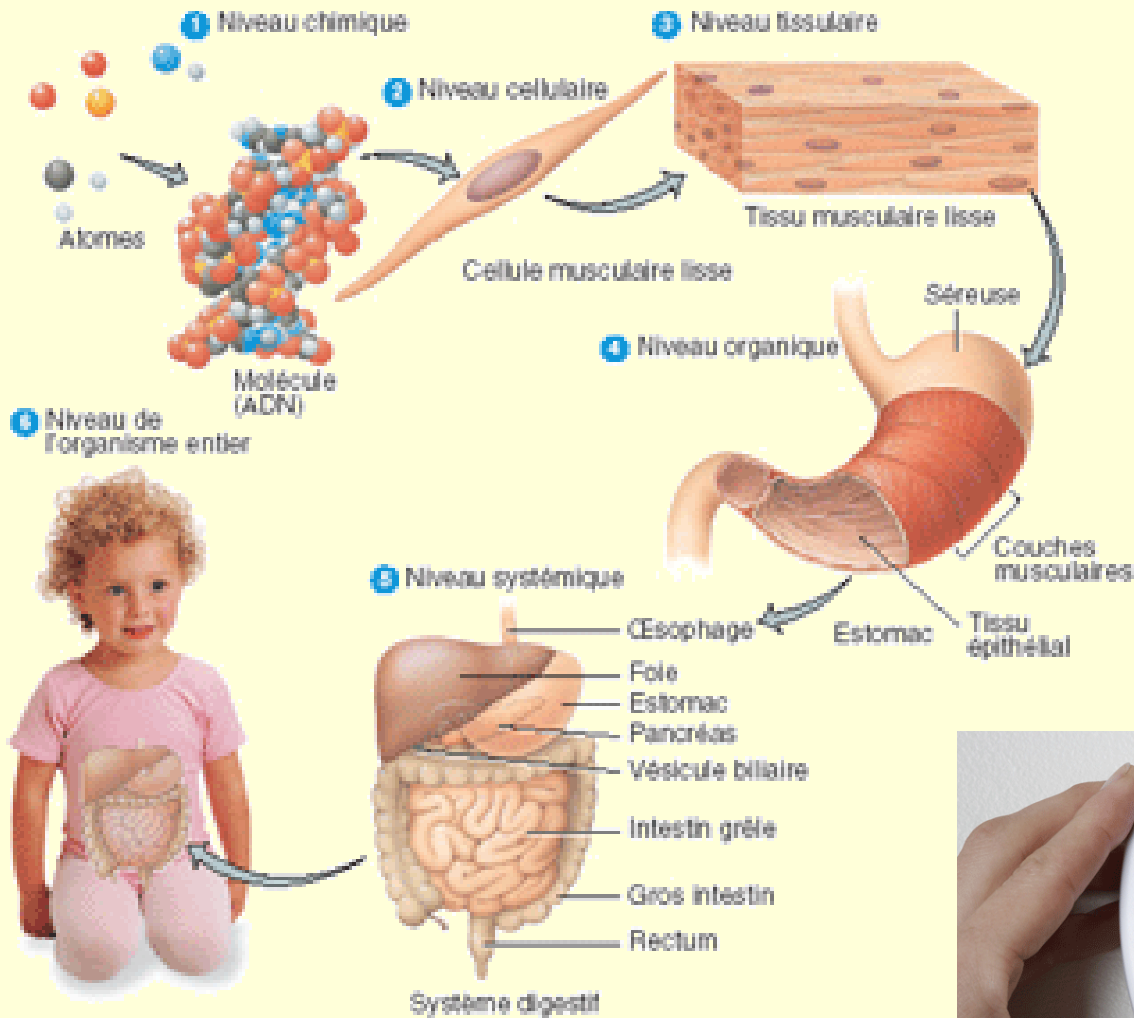
# Par régulation de chaque niveau...

organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)

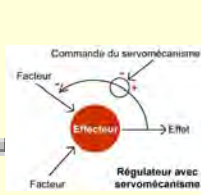


# ...et ajustement constant à la demande du niveau supérieur.

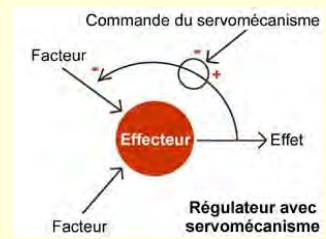
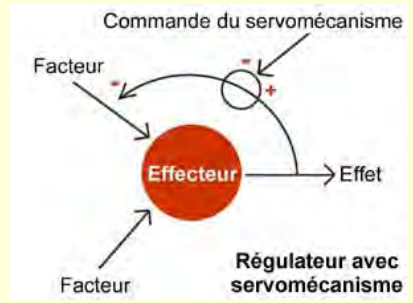
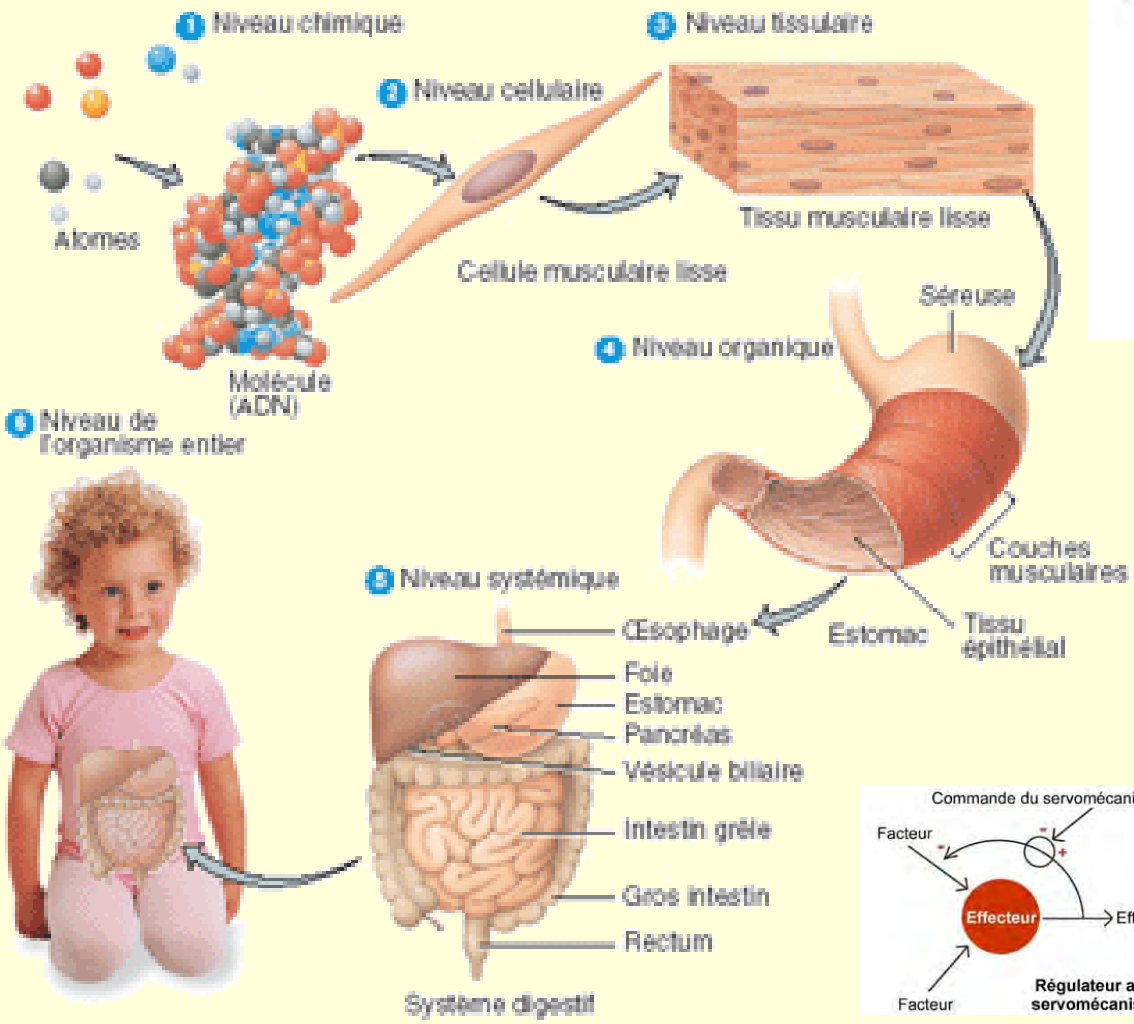
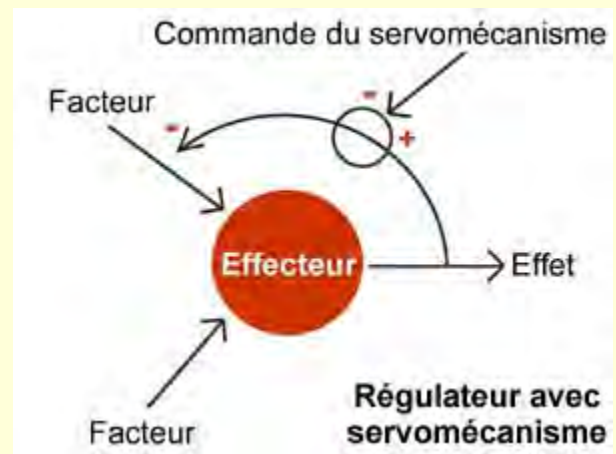
organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)



organisation structurale du

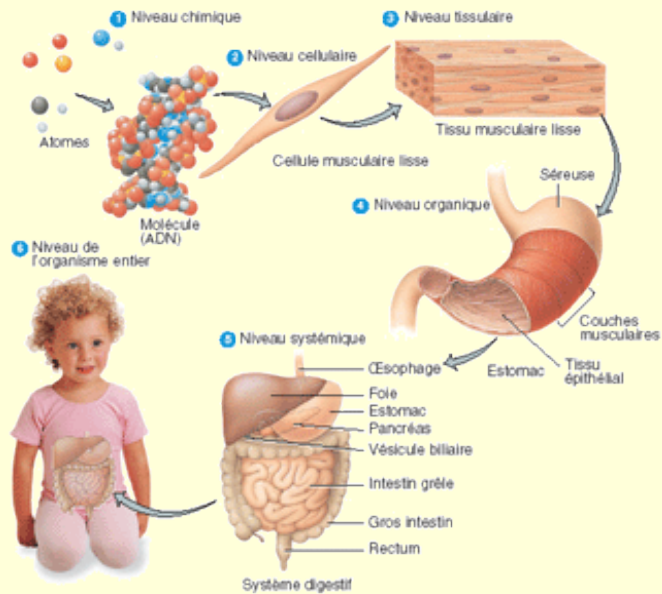


(Figure

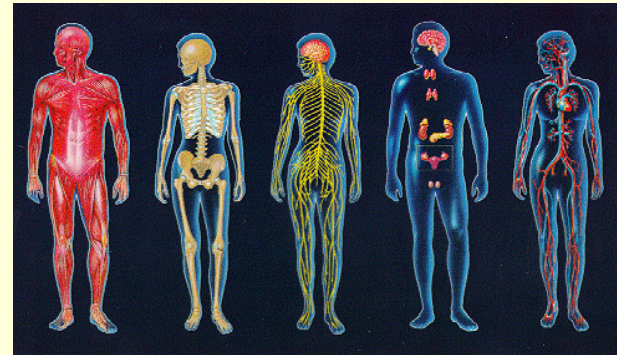




Niveaux d'organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)



Mais pour que chaque niveau d'organisation de chacun des grands systèmes du corps humain puisse s'intégrer fonctionnellement...



« Chaque sous-ensemble [doit avoir] la même finalité que l'ensemble : la protection de son **intégrité** dans le temps. »

- Henri Laborit, *La nouvelle grille*, p.191

Laborit ajoute à l'idée de niveaux d'organisation, **la notion de finalité**

[un thème important des conférences Macy]

qu'il reformule ainsi pour les être vivants :



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

Ou pour le dire comme **Hans Jonas**, dont on va parler dans la 2e partie de la séance :

The organism must eat and excrete;  
**otherwise it dies.** Without incessant metabolic exchange with the world there can be no emancipation of dynamic selfhood from mere material persistence.

Ce que l'on cherche aujourd'hui avec le « predictive processing » dont on va parler à la dernière séance par exemple, c'est de trouver « **comment** » l'organisme s'y prend pour demeurer dans cette « fenêtre de viabilité ».

Ainsi, Jelle Bruineberg écrit dans “The anticipating brain is not a scientist: The free-energy principle from an ecological-enactive perspective »

“The free-energy principle is a potentially unifying theory in theoretical neuroscience and theoretical biology,

stating that **all an organism needs to do in order to maintain its organization as an adaptive living system**

**is to minimize its information-theoretic free-energy in its interactions with the environment.**

This minimization can be done by predicting or anticipating sensory input

**or** by changing the environment to match what is anticipated.”

[ en **agissant** sur celui-ci... ]

Ou encore, pour le dire comme **Karl Friston** (Friston, 2005, 2010) :

l'hypothèse du codage prédictif s'inscrit dans un cadre théorique beaucoup plus large, **le principe de minimisation de l'énergie libre**,

une formulation mathématique de la manière dont les agents biologiques **résistent à la tendance naturelle au désordre et maintiennent leur état dans un environnement changeant.**

Les états de l'organisme doivent donc être de **basse entropie** et les agents biologiques doivent **minimiser la moyenne à long terme de la surprise.**

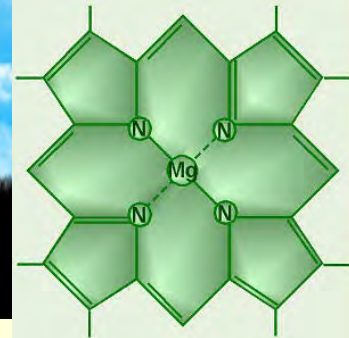
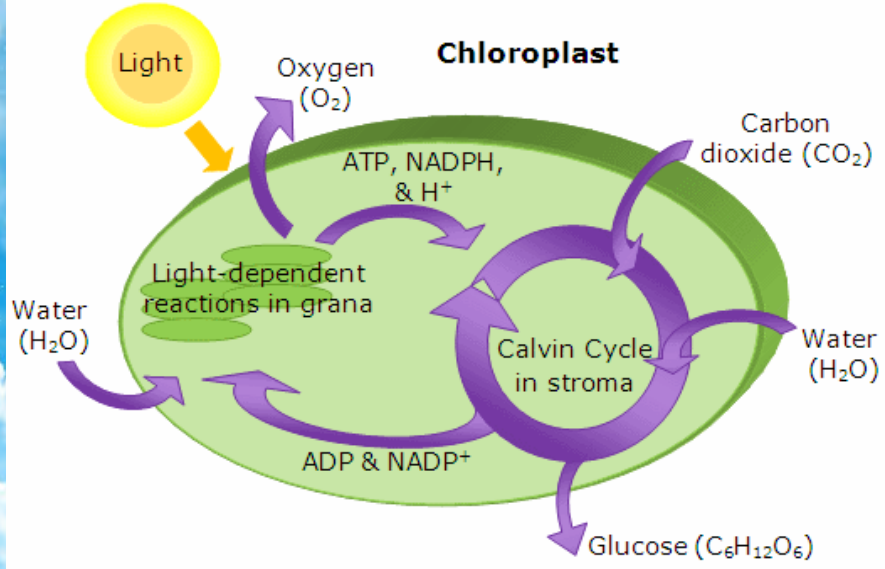
Si les agents minimisent l'énergie libre, ils minimisent implicitement la surprise.



Mais revenons à la formulation concise de Laborit :

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

- Henri Laborit



Plantes :

photosynthèse

grâce à l'énergie du soleil

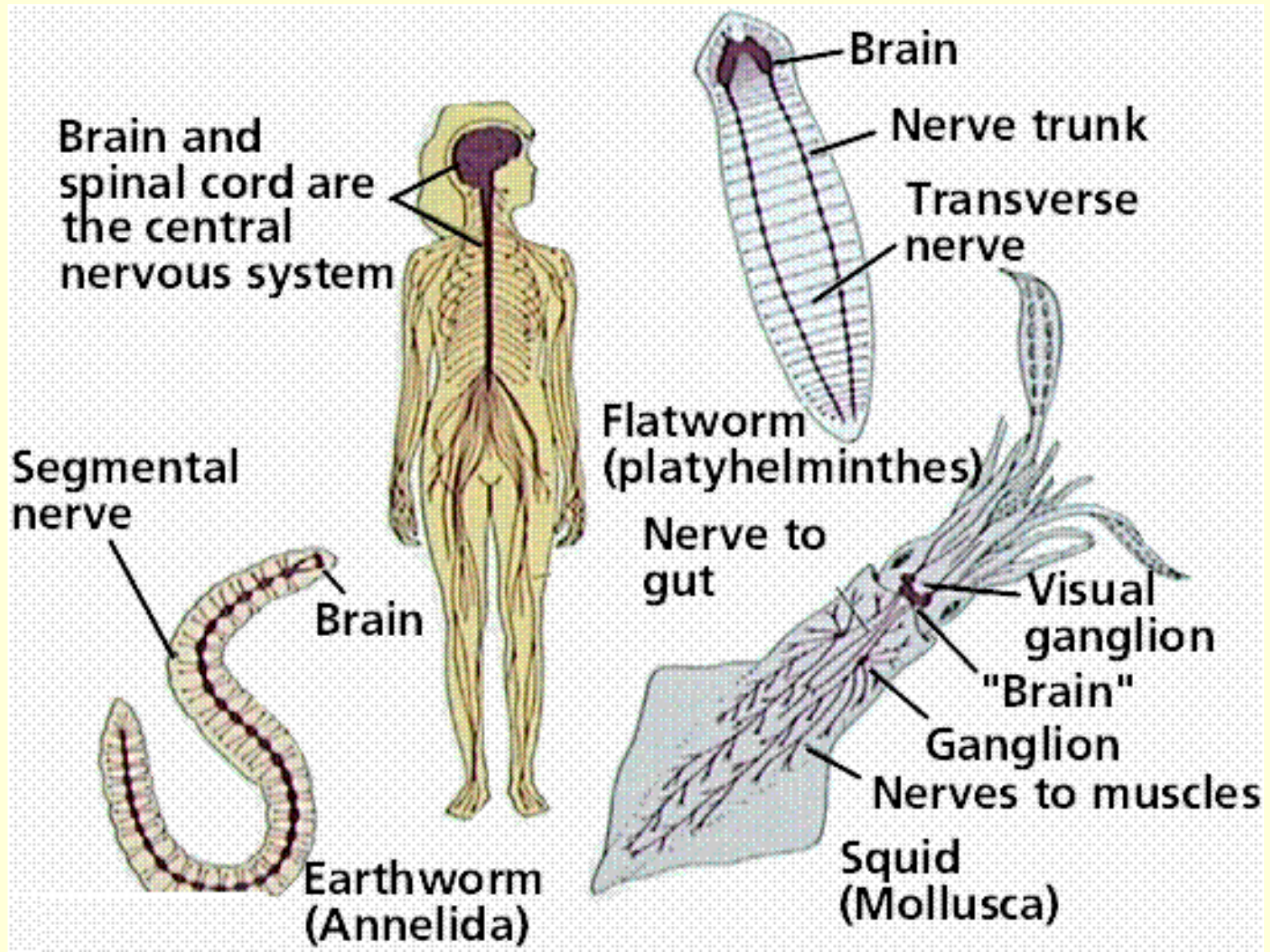




## Animaux :

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

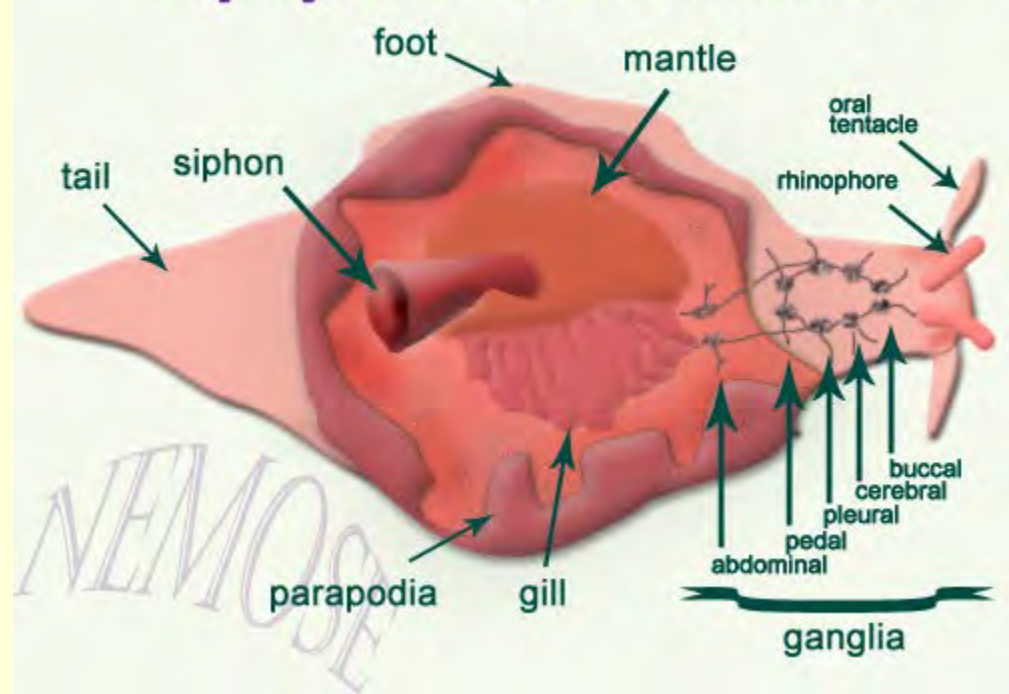
# Systemes nerveux !

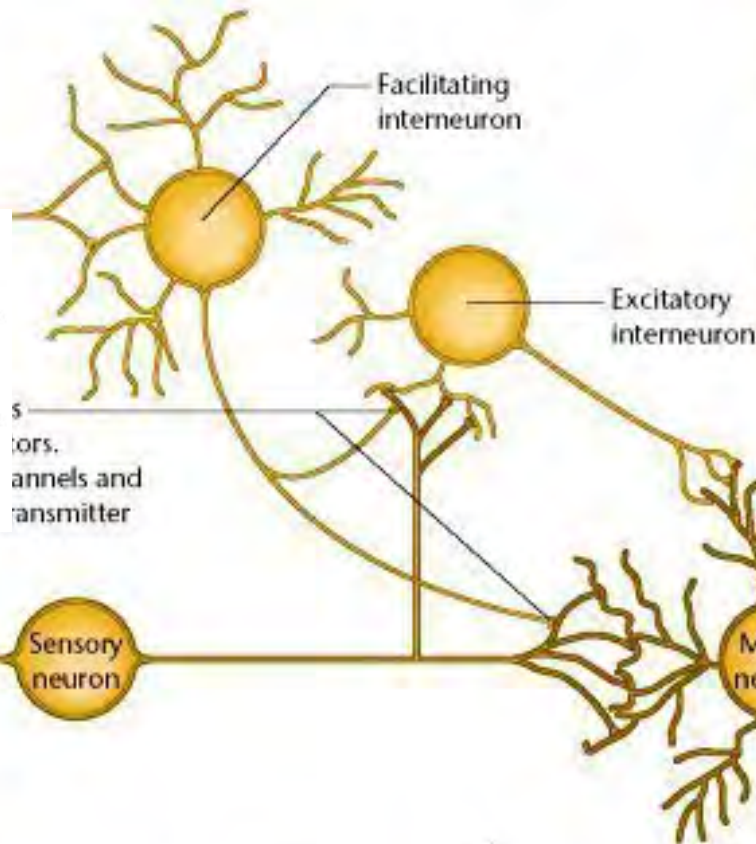
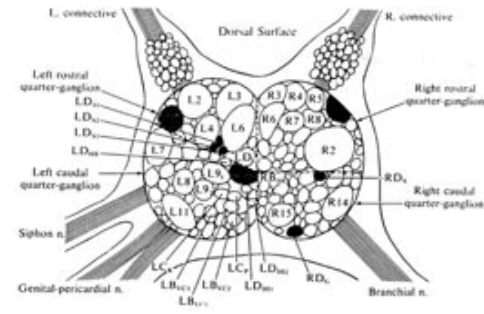
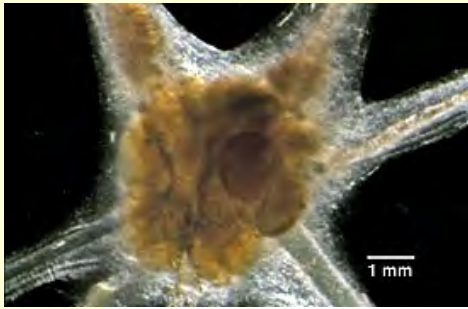






**Aplysie**  
(mollusque marin)





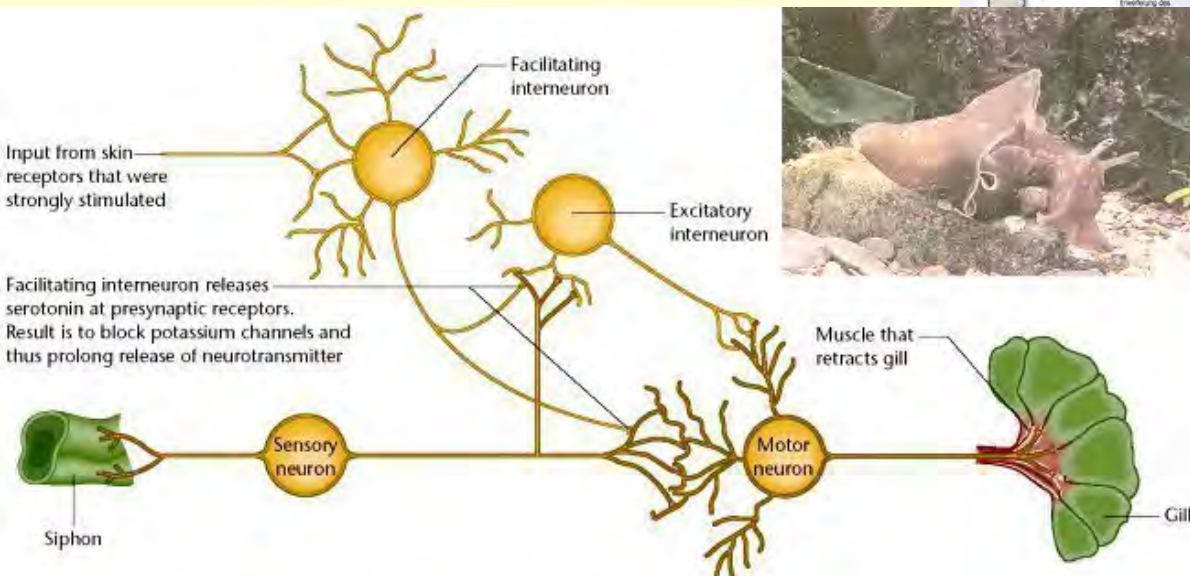
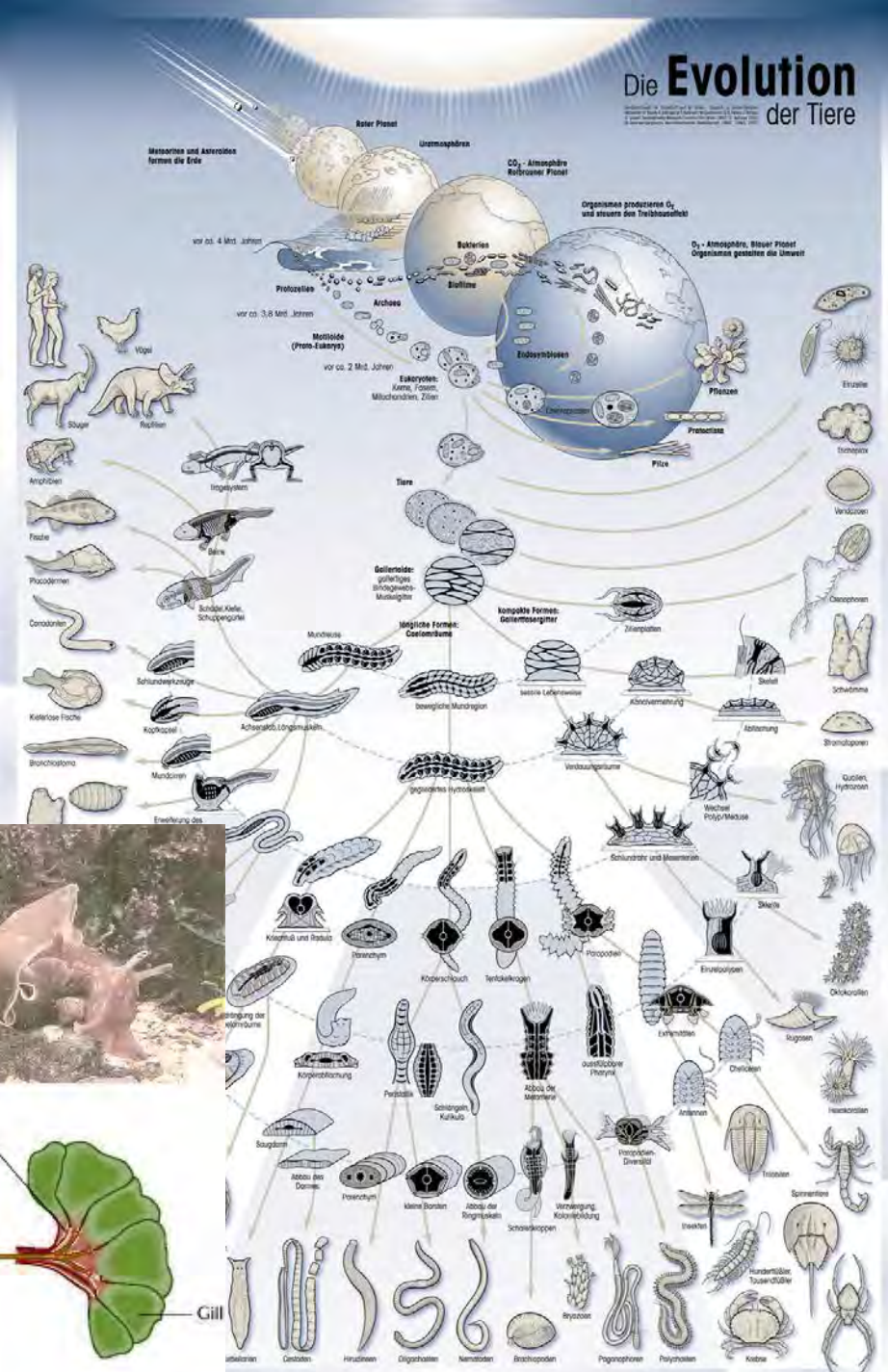
Une boucle sensori - motrice

**“In this scheme, sensory-motor coupling is always slave to the internal, embodied (homeostatic) dynamics, which the system must maintain to survive.”**

**Active inference, enactivism and the  
hermeneutics of social cognition**

Gallagher et Allen (in press) p.5

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



Input from skin receptors that were strongly stimulated

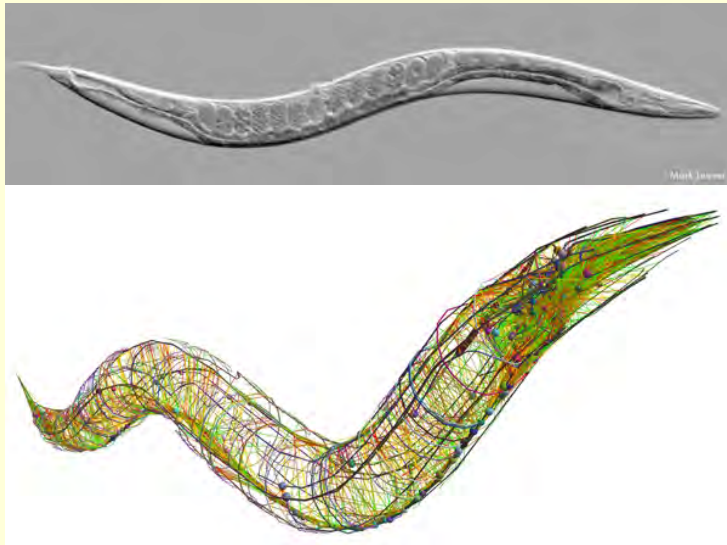
Facilitating interneuron releases serotonin at presynaptic receptors. Result is to block potassium channels and thus prolong release of neurotransmitter

Muscle that retracts gill

Gill

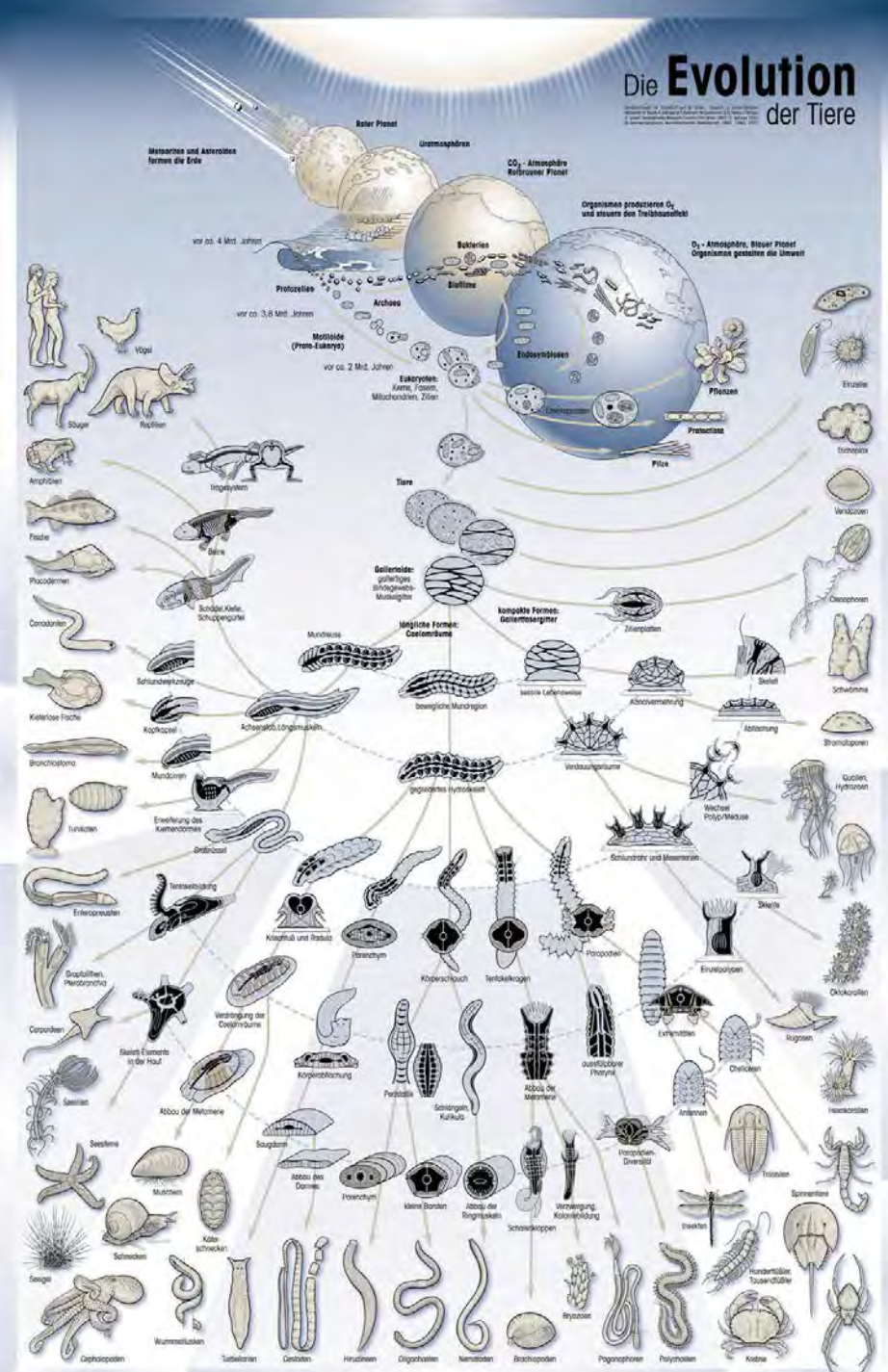
Pendant des centaines de millions d'années, c'est cette boucle-sensorimotrice qui va se complexifier...

**C. elegans :**  
302 neurones et 7000 synapses



- environ 1/3 de neurones sensoriels;
- environ 1/3 de neurones moteurs;
- environ 1/3 de neurones ayant des inputs et des output, suggérant un rôle dans l'intégration.

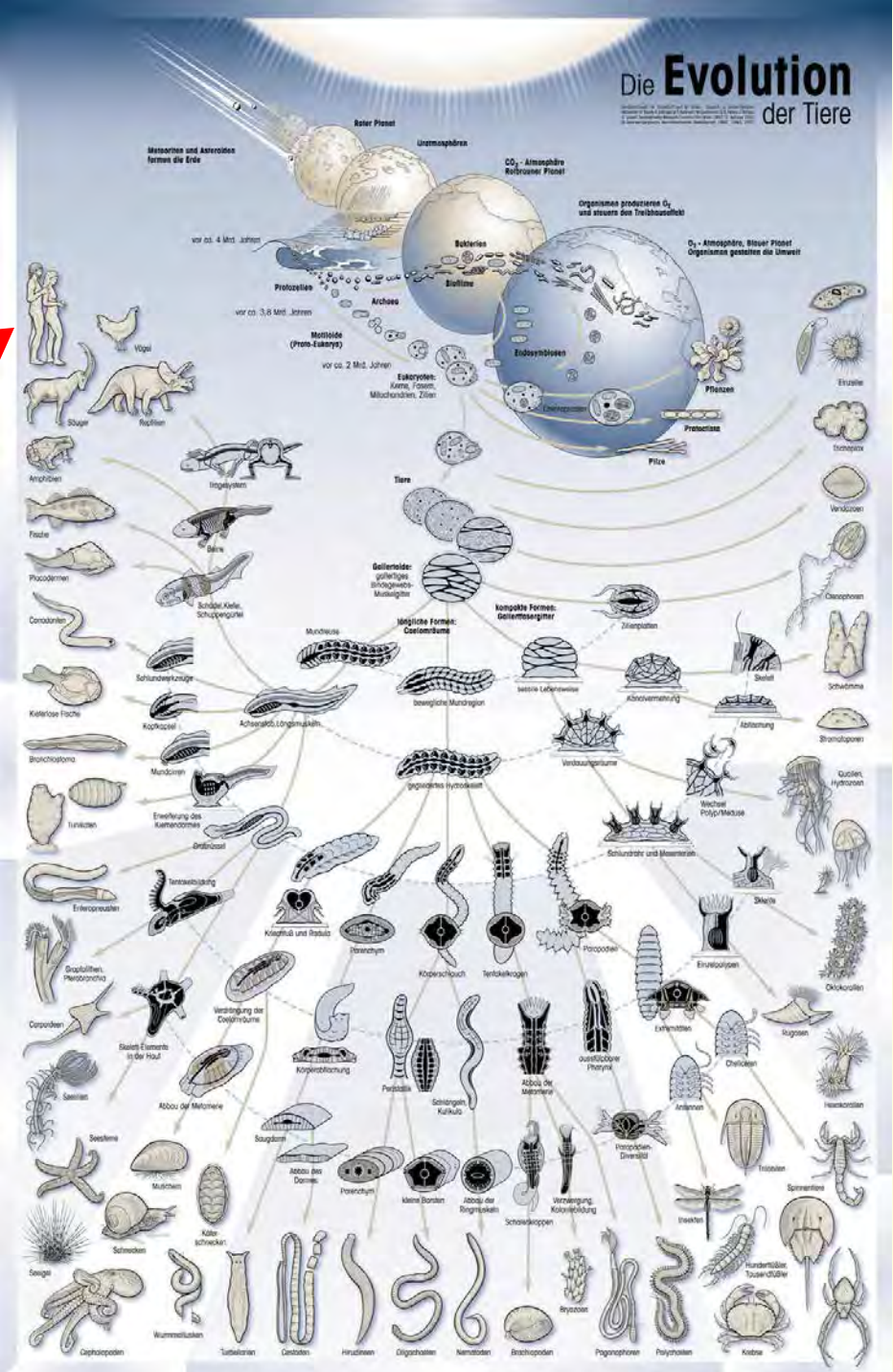
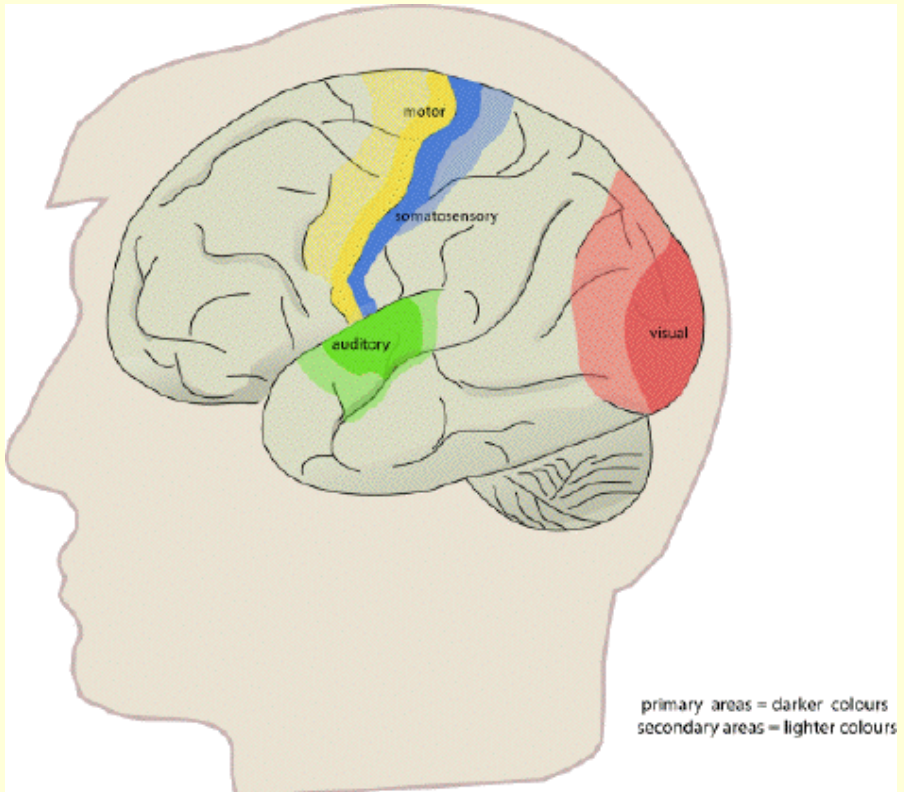
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bies.201100185/full#fig1>





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

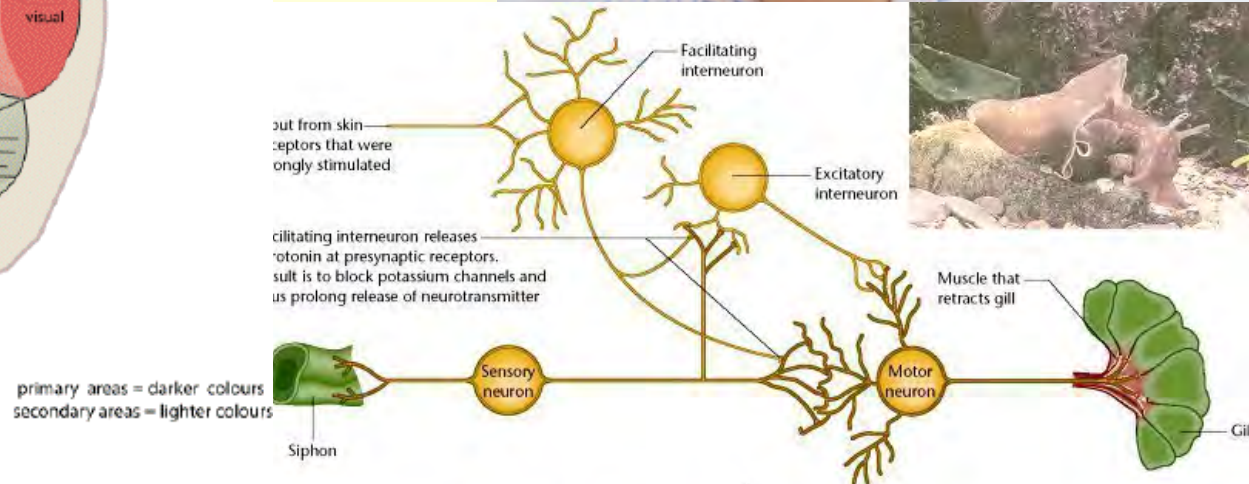
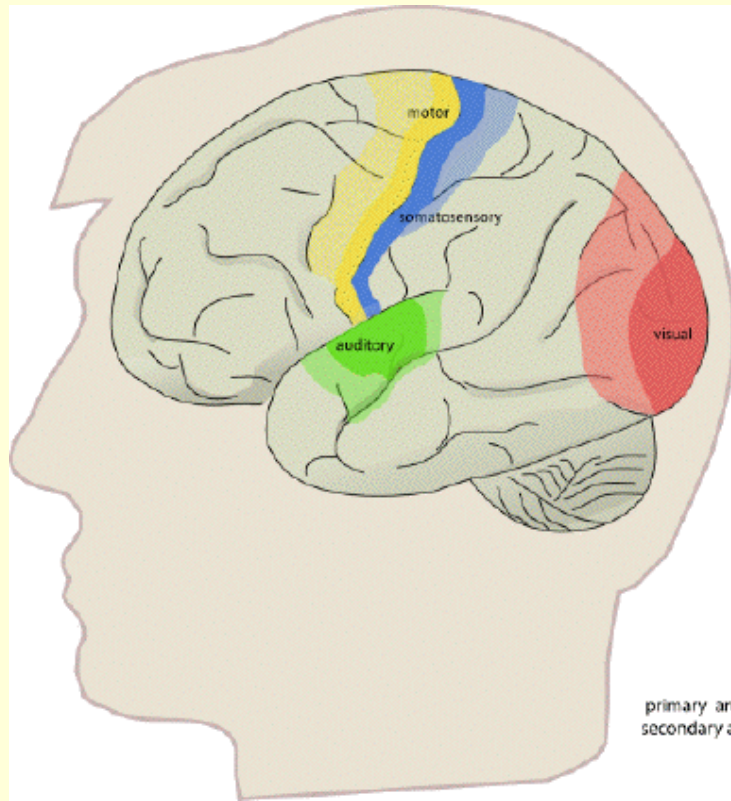
...et l'une des variantes sera nous !



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.

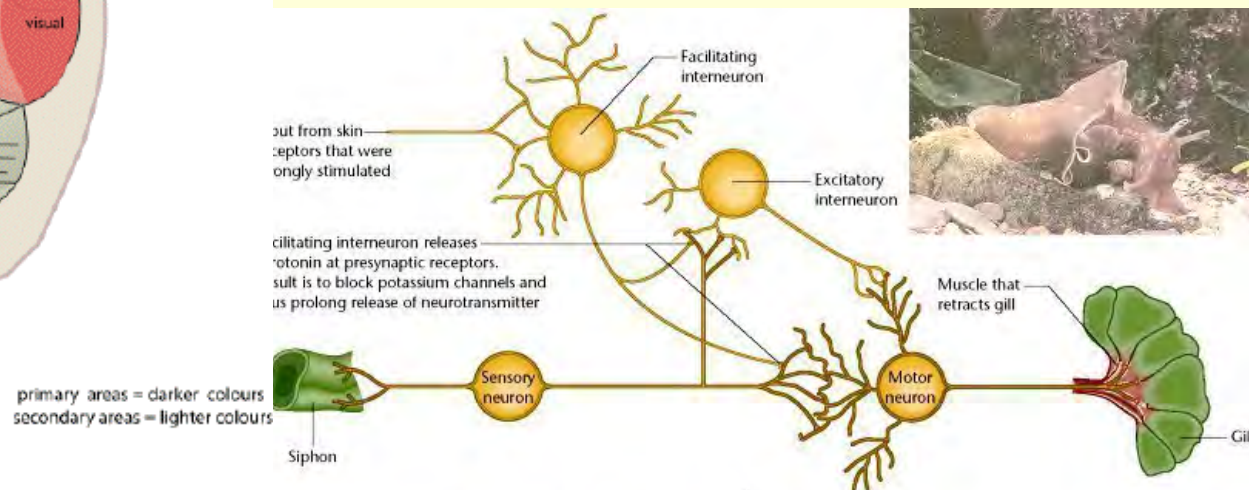
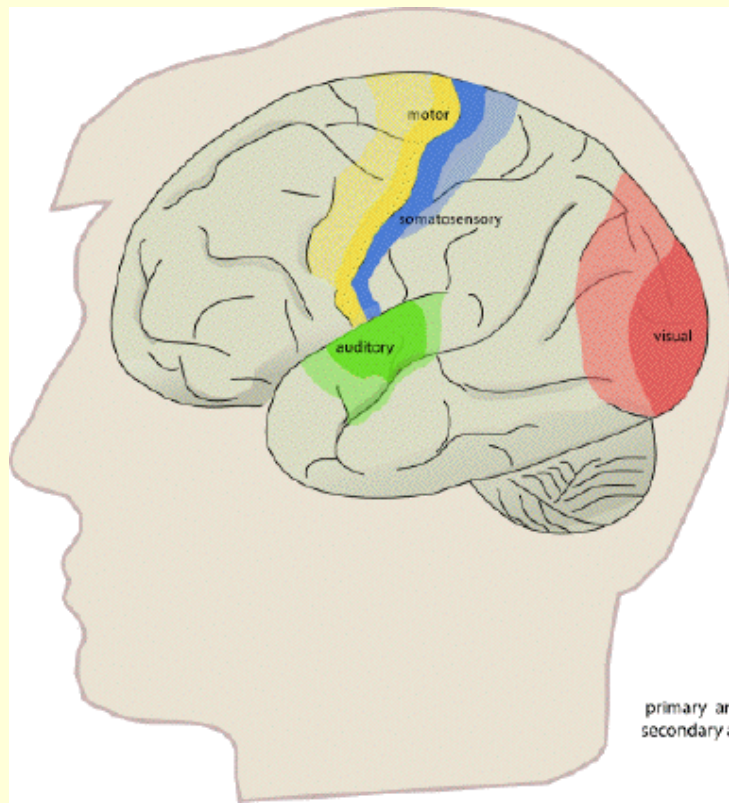




## En guise de conclusion (partielle...) :

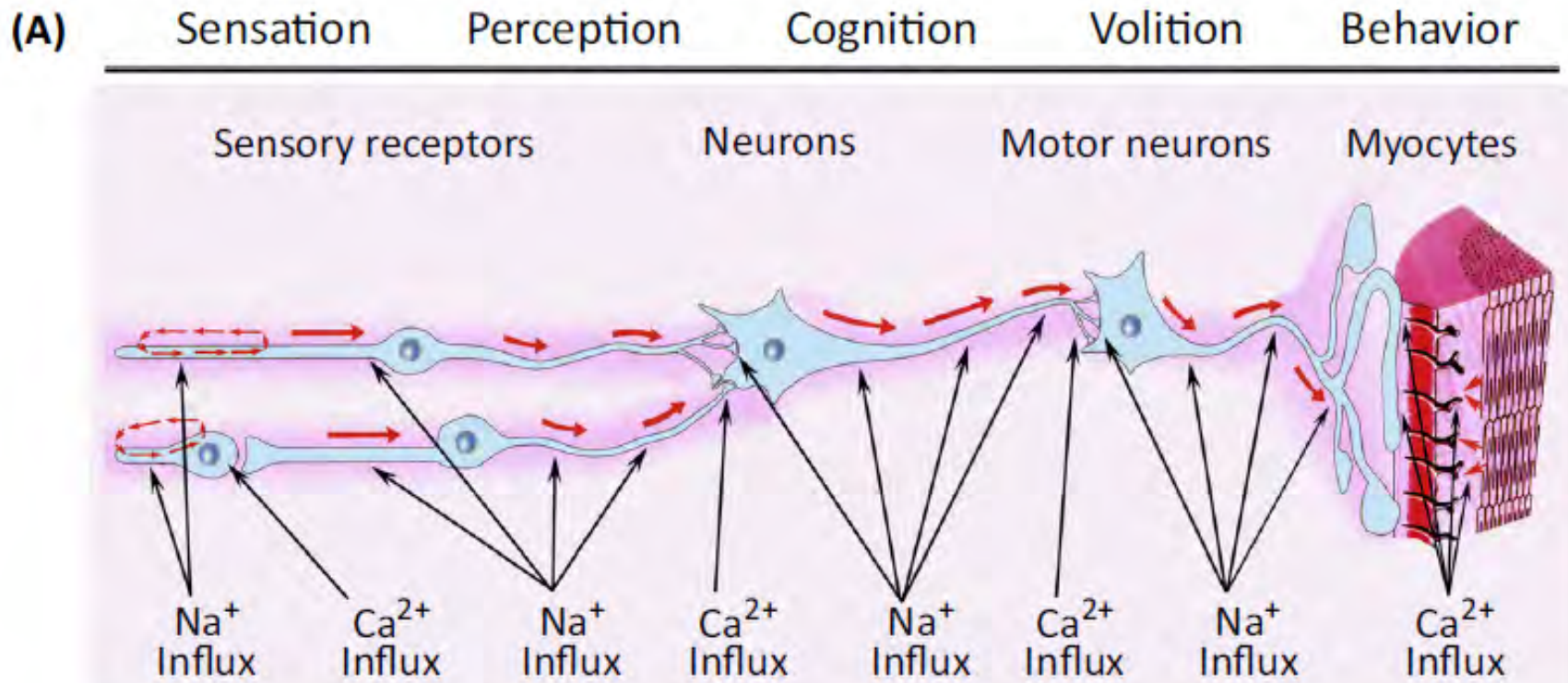
Il semble y avoir une autre constante remarquable durant l'évolution, du simple réflexe sensori-moteur jusqu'à la conscience humaine.

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



Cette perturbation environnementale première qui alerte en quelque sorte la cellule **qu'il se passe « quelque chose » qui la concerne** dans l'environnement serait, selon N.D. Cook, G.B. Carvalho et A. Damasio,

les **ions positifs**, essentiellement de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) qui entrent massivement dans la cellule...



From membrane excitability to metazoan psychology  
<http://www.cell.com/trends/neurosciences/abstract/S0166-2236%2814%2900128-3?cc=y>

Trends in Neuroscience, **December 2014**

## **2e partie de la séance :**

**Article :**

**Mind in Life. Biology, Phenomenology,  
and the Sciences of Mind**, Evan Thompson, 2007,  
p.140 à 165

(Autopoiesis and Teleology; Needful Freedom and  
the Selfhood of the Organism; Identity and Self-  
Making; The Self-Transcendence of the Organism;  
The Deep continuity of Life and Mind; Life Can Be  
Known Only by Life)

**En guise d'intro :**

**Petite anecdote sociologique des sciences**

(et en souvenir d'un certain 11/9)

Au début des années 1970, en parallèle à l'article théorique principal sur l'autopoïèse, Varela avait écrit un article plus court démontrant par une **simulation que leur intuition était juste**:

dans un monde artificiel en deux dimensions, on pouvait voir **l'émergence** spontanée d'unités qui **“s'auto-distinguaient”** en formant une **“membrane”**,

et qui montraient également des capacités **“d'auto-réparation”**.

Cet article fut aussi envoyé à plusieurs journaux scientifique, dont *Science* et *Nature*, et subit comme le premier sur l'autopoïèse un rejet complet.

« Aux yeux de la communauté scientifique, nous étions des **Martiens**, mais nous avons **un ami de poids**, infiltré dans la place forte, un des pères de la cybernétique, **Heinz von Foerster**.

Il a pris notre article, il a coupé le jargon, l'a posé sur le bureau de l'éditeur de la revue *Biosystems*, et lui a dit sans la moindre équivoque : "Publiez-le ! " »

Même si l'article fit l'objet de durs commentaires des évaluateurs de la revue, **Biosystems publia l'article au milieu de l'année 1974**, ce qui le rendit enfin accessible à la communauté scientifique mondiale (publié en anglais).



C'est lors d'une visite au **Chili en juin 1973** que von Foerster leur fit réécrire des passages de cet article.

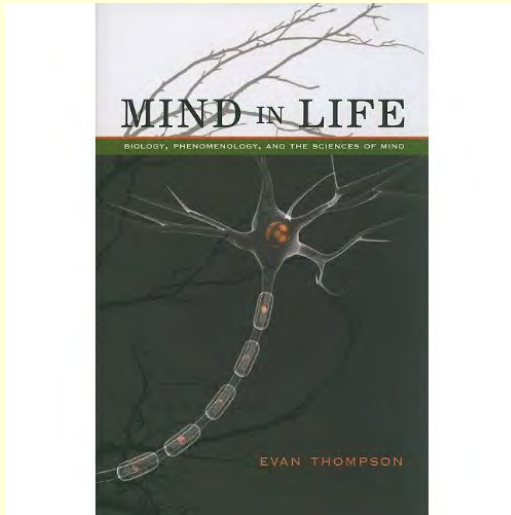
Le pays était alors déjà en crise, et peu de temps après, ce fut le **coup d'État de Pinochet le 11 septembre 1973.**

"Peu après le coup d'État de Pinochet, se souvient Varela, nous avons vécu l'horreur. Mon frère était recherché. Avec des amis, on l'a littéralement lancé par-dessus le mur de l'ambassade d'Argentine. C'était ça ou l'exécution.

[...] J'étais juste un militant socialiste repéré à l'université. **Une nuit, à trois heures du matin, ils sont passés chez moi. Par chance, je n'étais pas là.** Ce n'était pas vraiment une ambiance propice à la réflexion.»

On parlait d'événements contingents qui infléchissent le cours des choses ? ;-)

**Mind in Life** est un livre de **Evan Thompson**, publié en **2007**, et qui constitue un peu la « suite » de The Embodied Mind.



« Mind in life » : une continuité entre la vie et la pensée  
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2012/10/15/mind-in-life-une-continuite-entre-la-vie-et-la-pensee/>

Varela est décédé en 2001 d'un cancer à l'âge de 54 ans, et Thompson raconte dans la préface de Mind in Life, que ce livre était un projet commun avec Varela que Thompson a repris seul après la disparition de Varela.



# Autopoiesis and Teleology

**Kant** : l'auto-organisation implique une intentionnalité (une téléologie)

**Maturana & Varela** : l'autopoïèse est explicitement mécaniste et **anti-téléologique**

"Living systems, as physical autopoietic machines, are **purposeless systems** »

« **purposeless systems** » ???

Pourtant une machine auto-organisée qui s'auto-produit semble avoir comme finalité de... s'auto-produire !?

On va y revenir dans un instant, mais avant...



**Robert Rosen** : organismes et mécanismes (ou machines) **se distinguent**  
par **l'organisation auto-référentielle et circulaire du vivant**  
(un point au coeur des propos de Varela et Maturana)

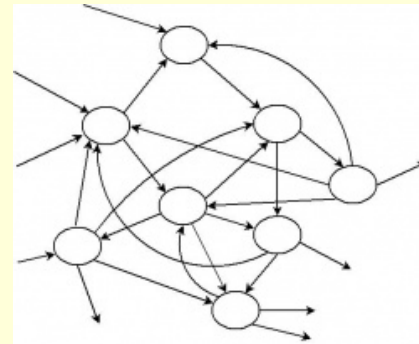
À cause de ce type d'organisation, **chaque composante n'est définissable qu'en terme de l'organisation globale à laquelle elle appartient;**

(et cette organisation globale n'est définissable qu'en spécifiant ses composantes).

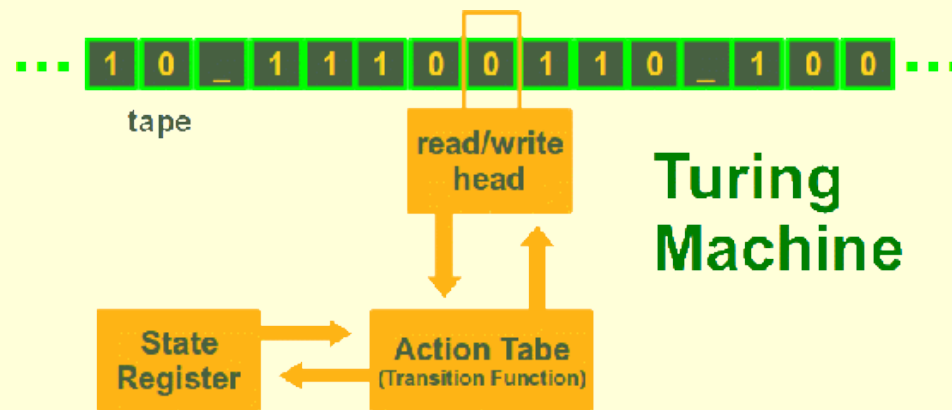
Donc les **organismes**, contrairement aux machines :

- ne peuvent être complètement “fractionnés” ou séparés analytiquement en parties dont la somme donnerait les propriétés du tout
- ne peuvent être adéquatement modélisée par des processus computationnel ou algorithmiques

Dans la terminologie de Rosen, les organismes sont “**complexe**”,



i.e. ils appartiennent à la classe des système qui ont des propriétés non fractionnables et sont non calculables par des machines de Turing.



**Turing  
Machine**

La notion de **Rosen** de "being closed to efficient causation"

**est analogue**

à celle de **Maturana et Varela** de "organizational closure"

(et dans les deux cas cela se produit dans un système thermodynamiquement et physiquement ouvert)

Aussi, la différenciation entre organismes et machines de **Rosen**

**est analogue**

à la différenciation entre système autonome avec clôture organisationnelle et système hétéronome défini par un contrôle extérieur de **Varela**.

## Je passe ...

Rosen qui dit avoir prouvé mathématiquement qu'une certaine classe de modèles relationnels (Metabolism-Repair systems or (M, R) systems,) dans lequel chaque fonction est entraînée par une autre fonction à l'intérieur du système, n'est pas calculable par une machine de Turing

Letelier , Marin et Mpodozis (2003) qui soutiennent que les systèmes autopoïétiques sont un **sous-ensemble** de ( M , R) systèmes.

Bourgine and Stewart's (2004) et leur "model of minimal autopoiesis as a random dynamical system [which] can be taken as a challenge to Rosen: what crucial feature of the living organization does this model leave out that Rosen's (M, R) systems succeed in capturing?"

Pour revenir à la conception de Maturana et Varela des systèmes vivants comme « **purposeless systems** » ???

En qualifiant les systèmes autopoïétiques de non intentionnels, Maturana et Varela voulaient dire que **les notions de but, d'intentionnalité et de fonction ne sont pas nécessaire pour la définition de l'organisation de la vie.**

Contre ce point de vue que la téléonomie "est essentiel à la définition même des êtres vivants ", Maturana et Varela écrivent :

« ... La connexion entre ces sorties , des entrées correspondantes, et leur relation avec le contexte dans lequel l'observateur les inclut, détermine ce que nous appelons le but ou l'intention de la machine; **cette intention réside nécessairement dans le domaine de l'observateur qui définit le contexte** et établit les nexus.

De même manière, **la notion de fonction apparaît dans la description faite par l'observateur** des composants d'une machine ou d'un système en référence à une entité globale [...].

Donc c'est une critique contre une **notion fonctionnaliste de l'intentionnalité**, l'idée qu'une entité sert une finalité qui lui est extérieure (ou attribuée de l'extérieur).

Pour Maturant et Varela, bien que cette notion puisse avoir des qualités pour la communication, **elle n'a pas de valeur explicative sur l'organisation du système.**

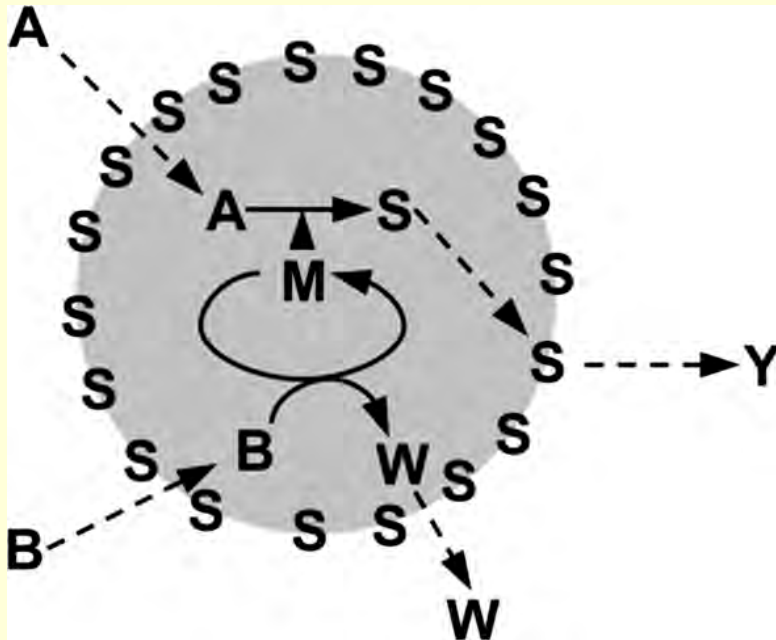
Trois points sont importants ici nous dit Thompson :

- 1) Se passer de description fonctionnelles extrinsèque des composantes d'un système n'est pas incompatible, logiquement, avec le fait que ce **système entier puisse avoir une intentionnalité intrinsèque.**



Rappel : on suppose qu'un système a une intentionnalité intrinsèque uniquement dans le cas où chacune de ses composantes est à la fois un produit et un producteur des autres composantes (i.e. le système est auto-organisé comme un tout).

Les systèmes autopoïétiques satisfont ces conditions.



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

Un système autopoïétique est un **système ouvert** (du point de vue thermodynamique), qui :

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

Mais c'est un système est **fermé** du point de vue **opérationnel**.

Varela parle de « **clôture opérationnelle** ». Cela signifie que les composantes individuelles peuvent être interprétées à la fois en termes causaux ou en terme de finalité en relation aux autres composantes et à l'ensemble du système.

Trois points sont importants ici nous dit Thompson :

- 1) Se passer de description fonctionnelles extrinsèque des composantes d'un système n'est pas incompatible, logiquement, avec le fait que ce **système entier puisse avoir une intentionnalité intrinsèque.**
- 2) En énumérant les conditions d'une organisation autopoïétique, aucune référence n'est faite à quelque finalité, intentionnalité ou fonction **aux composantes des processus ou du système entier.**

Par conséquent, la théorie de l'autopoïèse ne présuppose pas une intentionnalité intrinsèque sans aucune analyse **mais au contraire lui donne une explication naturaliste.**

- 3) Le terme "intrinsèque" dans cette interprétation naturaliste doit être considéré comme signifiant "**constitutif**".

L'intentionnalité intrinsèque est donc une propriété constitutive des systèmes autopoïétiques, mais c'est une **propriété émergente** analysable en fonction de l'aspect relationnel de l'organisation autopoïétique.

# Petite parenthèse sur la notion de “propriétés émergentes”

Exemple de propriétés émergentes en chimie



Sodium (Na)  
(métal hautement inflammable)

+

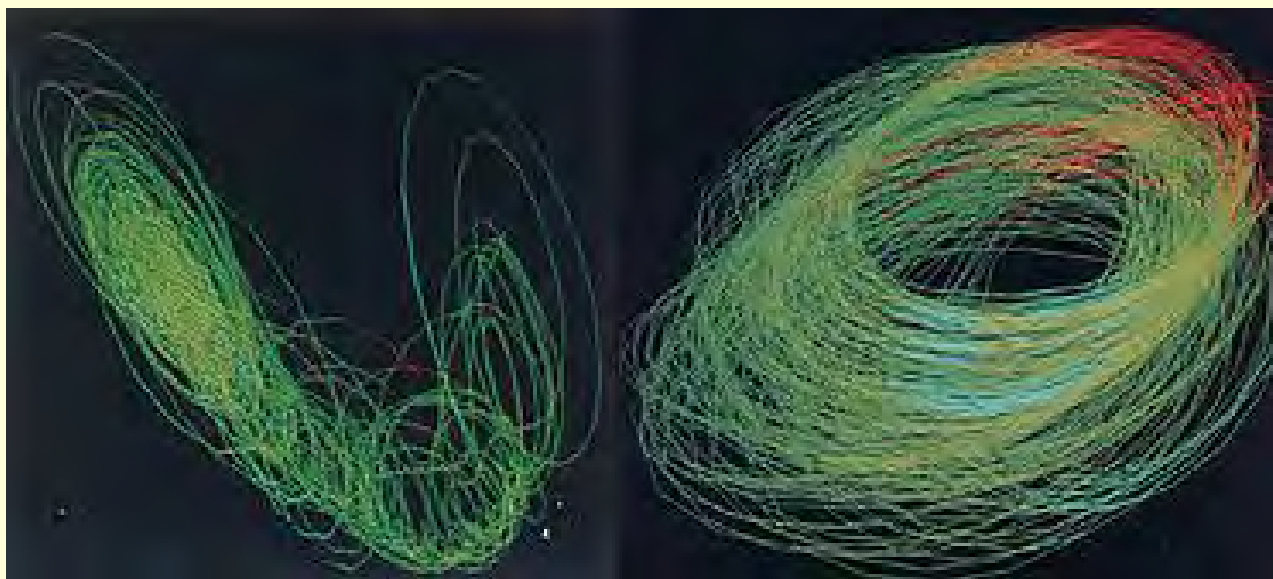
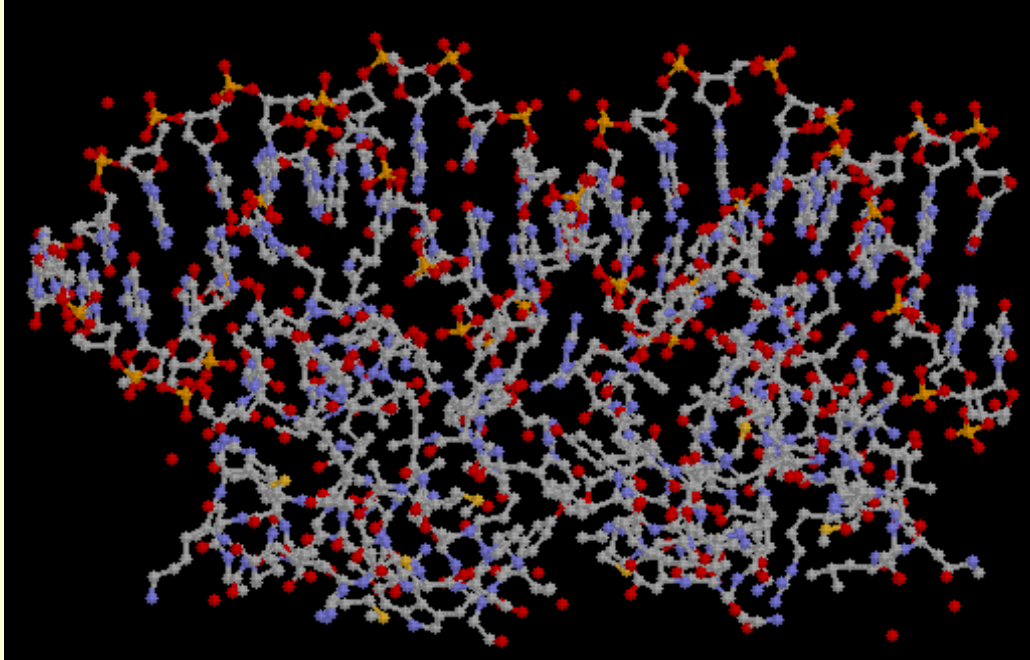


Chlore (Cl)  
(gaz très toxique)

=



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



## **Théorie des systèmes dynamique (Dynamic System Theory) :**

étude des systèmes complexes avec de multiples éléments qui changent au cours du temps.

Prémisse centrale : **auto-organisation**,

i.e. **émergence** spontanée de patterns cohérents d'ordre supérieur résultant de l'interaction récursive entre les composantes plus simples d'un système dynamique complexe.

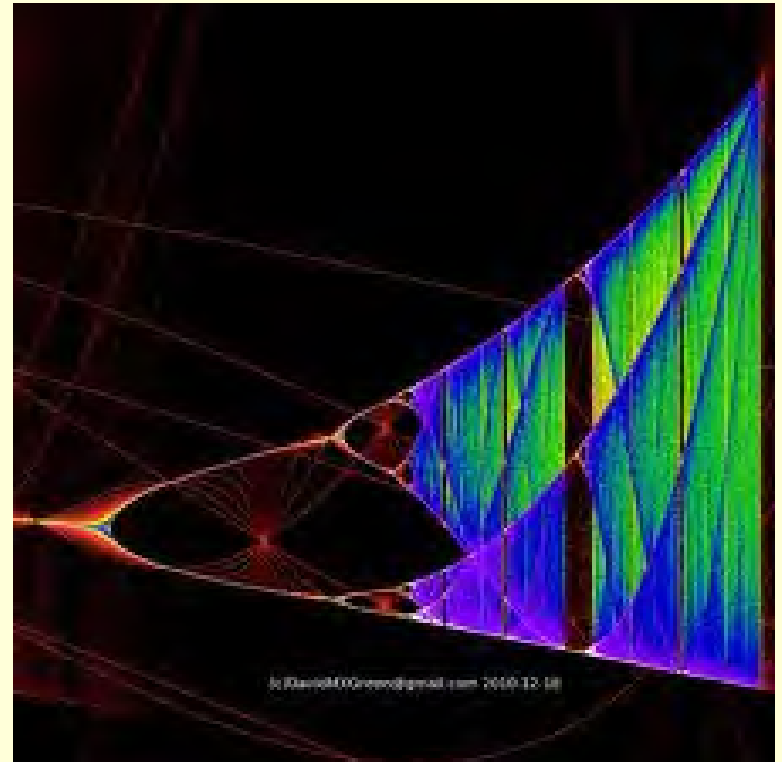
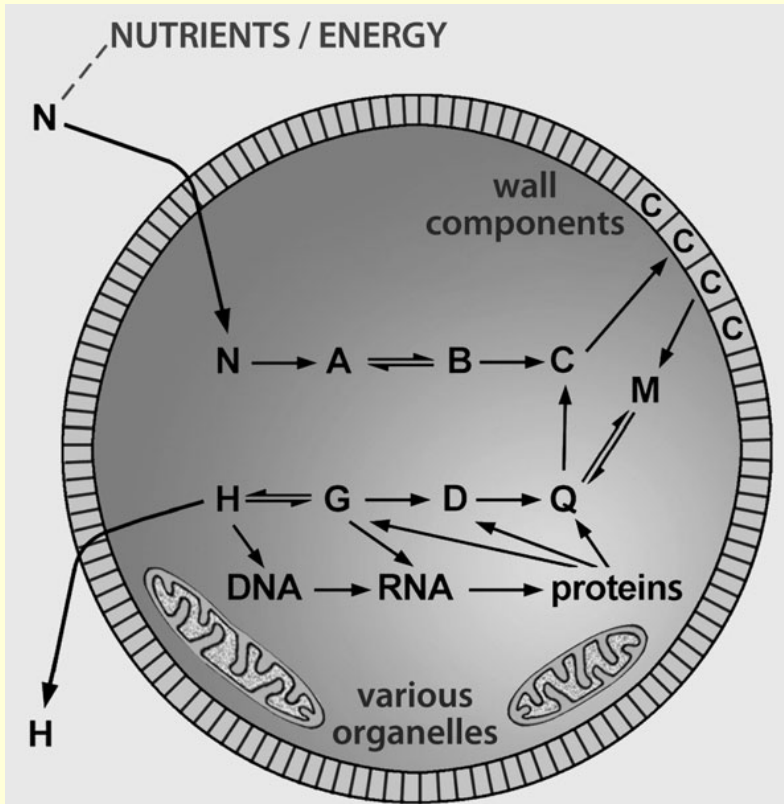
(donc une **causalité circulaire** entre différents niveaux du système)

**Evolutionary Systems Theory:  
A Unifying Meta-Theory of Psychological Science**

Paul B. Badcock

Review of General Psychology, **2012**, Vol. 16, No. 1, 10–23

“We need another important element, the phenomenon we have called **emergence** – the arising of novel properties at various levels of increasing structural complexity, where “novel” means that these properties were not present in the single parts or components. » (The System Views of Life)



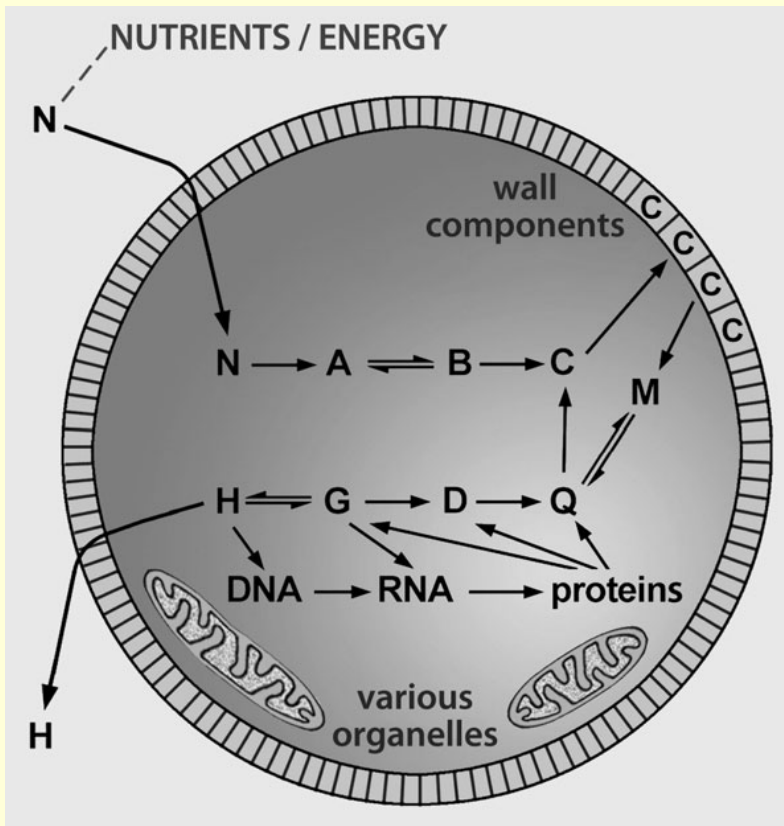
Il n'y a pas d'endroit particulier qui pourrait être associé à un "centre de la vie" à l'intérieur de la cellule (pas plus qu'il n'y a de "centre de" quoi que ce soit dans le cerveau...)

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 une **propriété émergente** qui n'est pas présente dans les parties mais dans le tout que forment ces parties.

"Le tout est plus que la somme de ses parties."

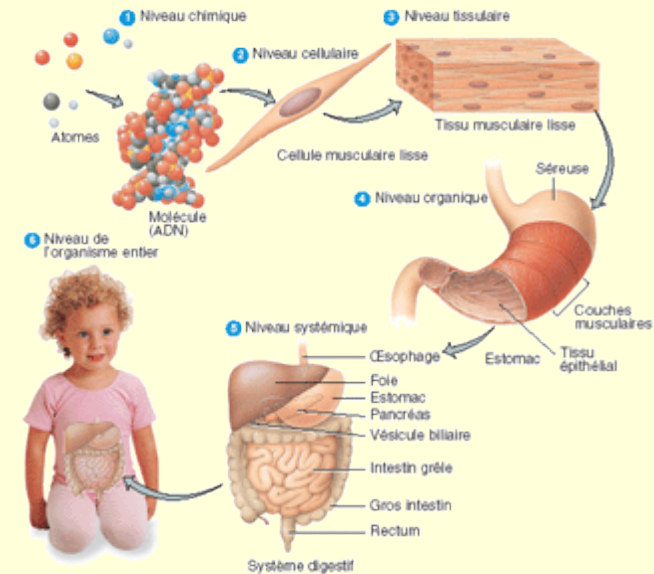


L'approche réductionniste en biologie est basée sur l'idée de **diviser les systèmes biologiques en leurs constituants** (exemple : molécules, pour la biologie moléculaire).

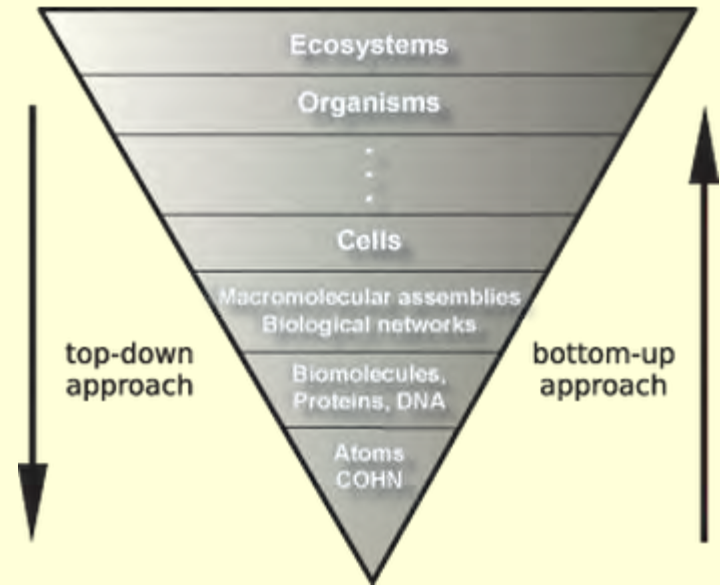
**On étudie ensuite ces parties séparément** et on tente d'inférer les propriétés du système à partir de ces résultats.

Cette approche suggère donc que l'on pourra comprendre l'ensemble du système à partir de nos connaissances fonctionnelles de ses constituants.

Niveaux d'organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)



© 2011 ÉDITIONS DU NOUVEAU PÉDAGOGIQUE INC.



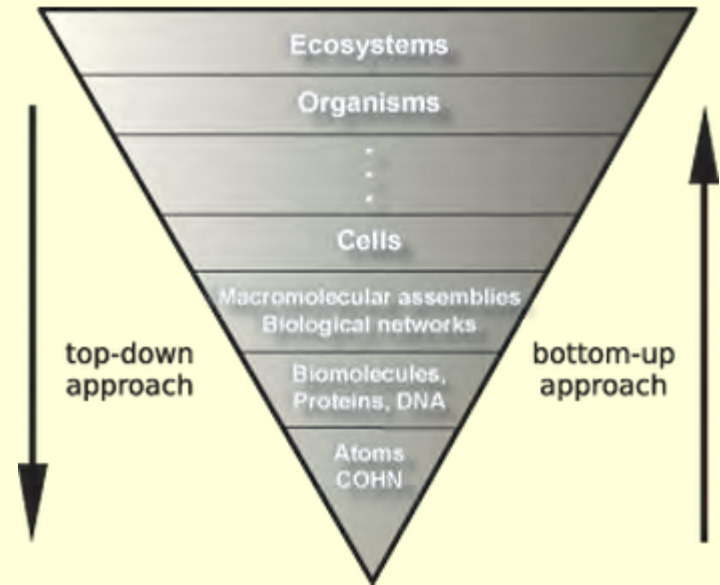


Mais il est clair que **certaines caractéristiques fonctionnelles ne peuvent pas être analysées par l'approche réductionniste.**

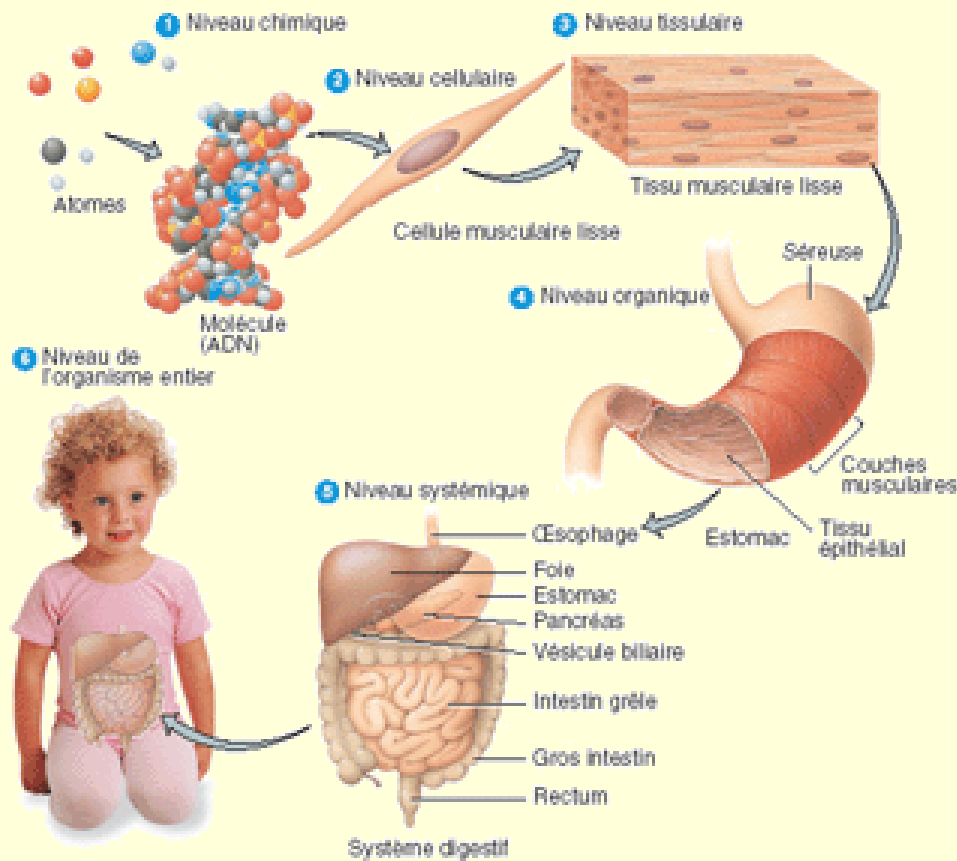
Et ce, parce que les systèmes biologiques sont un cas particulier d'une classe plus générale qu'on appelle les **systèmes complexes.**

Dans les systèmes complexes, **la non linéarité des interactions entre les composantes** rend impossible la compréhension fonctionnelle du systèmes comme la somme de ses parties.

Et cela n'est pas dû à nos connaissances limitées, mais bien à quelque chose d'inhérent à la manière dont les composantes interagissent ensemble dans le système.



Organisation structurale du corps humain (Figure 1.1)



Et donc s'il est vrai que la biologie se construit à partir de la chimie,

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

L'approche **réductionniste** en science où l'on cherche à réduire le tout en ses parties n'est applicable que lorsqu'on parle de **ce qui compose** la structure du vivant.

Et non des propriétés (issues de la forme

Trois points sont importants ici nous dit Thompson :

- 1) Se passer de description fonctionnelles extrinsèque des composantes d'un système n'est pas incompatible, logiquement, avec le fait que ce **système entier puisse avoir une intentionnalité intrinsèque.**
- 2) En énumérant les conditions d'une organisation autopoïétique, aucune référence n'est faite à quelque finalité, intentionnalité ou fonction **aux composantes des processus ou du système entier.**

Par conséquent, la théorie de l'autopoïèse ne présuppose pas une intentionnalité intrinsèque sans aucune analyse **mais au contraire lui donne une explication naturaliste.**

3) Le terme "intrinsèque" dans cette interprétation naturaliste doit être considéré comme signifiant "**constitutif**".

L'intentionnalité intrinsèque est donc une propriété constitutive des systèmes autopoïétiques, mais c'est une **propriété émergente** analysable en fonction de l'aspect relationnel de l'organisation autopoïétique.

Considérant tout cela, il serait préférable d'appeler **intentionnalité immanente** cette sorte d'intentionnalité constitutive.

Dans le sens où c'est une propriété constitutive que le système entier possède du fait de la façon dont il est organisé.

Varela en est venu éventuellement, dans l'un de ses derniers articles (Weber and Varela 2002), à croire que cette notion **d'intentionnalité immanente** n'est pas simplement descriptive mais qu'elle est aussi **explicative**.

Elle est explicative parce qu'elle rend visible un pattern d'activité dynamique propre aux systèmes vivants qu'on manquerait autrement.

Et il appelle ce pattern le double pattern de **l'identité** et du "**sens-making**".

[deux aspects d'un même processus émergent...]

## 1) Identité :

L'autopoïèse entraîne la production et le maintien d'une identité dynamique malgré les changements matériels de ses composantes physiques.

On parle aussi **d'auto-renouvellement (self-renewal)** malgré lequel la cellule ou l'organisme maintient son pattern d'organisation général.

"Every five days you get a new stomach lining.

You get a new liver every two months.

Your skin replaces itself every six weeks.

Every year, ninety-eight percent of the atoms in your body are replaced.

This nonstop chemical replacement, metabolism, is a sure sign of life"

(Margulis and Sagan 1995, p. 23).

## 2) Sense-making :

Un système autopoïétique doit donner du sens au monde qui l'entoure pour demeurer en vie.

Le sense-making va changer le monde physicochimique en un environnement où les choses ont plus ou moins de valeur ou d'importance, i.e. un “**Umwelt**” pour le système vivant.  
[autrement dit, un gradient de choses plus ou moins bonnes pour l'organisme]

Pour Varela, le sense-making n'est rien d'autre que l'intentionnalité **dans sa forme biologique minimale.**

Dans un article de 2005, **Ezequiel Di Paolo** démontre que si la définition originale de l'autopoïèse de Maturana et Varela est suffisante pour décrire « l'identité » (l'aspect auto-production et self-maintenance)

elle n'est **pas suffisante pour rendre compte de la “finalité projective” du sense-making.**

Ce dernier **implique le monitoring et la régulation active** du réseau autopoïétique par des mécanismes homéostatiques et homéodynamiques.

[la même homéostasie dont parlait Bernard et Cannon]

En ce sens, le sense-making est **normatif**.

**Et la seule norme que l'autopoïèse peut fournir** est la norme “tout ou rien” de la continuité de l'identité, du maintien de la structure

et pas **la norme graduelle** qui est en jeu lorsqu'un organisme cherche activement à améliorer les conditions de maintien de l'intégrité de son identité et de sa structure.

**Cette incapacité à produire une norme graduelle pose donc un problème à la définition originale de l'autopoïèse** (découlant de la nécessité du sense-making)

Thompson croit que Varela avait implicitement fait sienne cette conception des choses quand il décrit le sense-making comme résultant du besoin constant et nécessaire du processus autopoïétique **de suppléer à ce qui lui manque pour pouvoir maintenir sa structure.**

Di Paolo dit que cette conception normative des choses est nécessaire sans quoi on ne pourrait simplement pas rendre compte de phénomènes comme le stress, la maladie, la fatigue ou la santé.

Et même des phénomènes plus généraux comme la plasticité et l'adaptation.

Voilà pourquoi Di Paolo affirme qu'une capacité distincte, **l'adptivité** (“adptivity”), doit être ajoutée à celle de l'organisation autopoïétique responsable de l'identité.

C'est seulement avec ces deux capacités, **identité ET adaptativité**, que le système pourra se maintenir en régulant activement son métabolisme de telle sorte que ses conditions de viabilité seront maintenues.

Et cela l'amènera naturellement à **agir sur son milieu pour le modifier** en accord avec les normes internes de son activité.



**L'adaptivité** permet donc d'être tolérant aux perturbations de toutes sortes en les **monitorant activement** et en **compensant pour elles par des mécanismes de régulation** (feedback).

[ pouvant par le fait même créer de nouvelles structures et de nouvelles connexions...]

Tout cela, bien entendu, toujours en prenant **l'identité autopoïétique** comme la "**norme interne**".

C'est de cette façon que **le sens-making devient original ou intrinsèque** au système (et non attribué de l'extérieur).

## **En résumé :**

Les êtres vivants **incarnent une intentionnalité immanente** qui se manifeste en deux modes complémentaires :

**l'autopoïèse** : la finalité intrinsèque de l'auto-production

**le sense-making** : la finalité projective de l'adaptivité et de la cognition.

Cette conception élargie de l'autopoïèse est donc suffisante pour rendre compte de la cognition à sa plus simple expression.

Et c'est la base de **la thèse de la continuité entre la vie et la cognition**

("the deep continuity of life and mind")

Comme on l'avait mentionné la séance passé, l'aspect **subjectif conscient n'est pas pris en compte dans la cognition** au sens classique...

Donc Thompson nous dit qu'il faut aussi considérer **l'aspect phénoménologique de l'intentionnalité** comme caractéristique de l'expérience vécue.

Ce qui est essentiellement une autre façon de parler de "**l'explanatory gap**", du fossé entre le monde matériel et la conscience subjective (le "mind").

Pour Thompson, c'est seulement en creusant cette question que nous pourrions avoir une compréhension complète de l'intentionnalité immanente de l'organisme et de la profonde continuité de la vie et le "mind".

Les écrits de **Hans Jonas** sont éclairants sur ce sujet même s'ils prédatent la théorie de l'autopoïèse qu'il permet d'enrichir.

**Jonas** semblait avoir en tête l'aspect central de l'autopoïèse lorsqu'il écrivait :

"The introduction of the term '**self**,' unavoidable in any description of the most elementary instance of life, indicates the emergence, with life as such, of internal identity—and so, as one with that emergence, **its self-isolation too from all the rest of reality**"

Avec l'émergence de l'identité d'un être vivant vient donc **aussi un "soi" isolé du reste du monde.**

[ce qui va nous amener à faire des prédictions sur les causes de nos sensations, va dire Friston plus tard...]

Or l'autonomie de l'organisme est loin d'être isolé du monde extérieur, il en dépend même essentiellement.

Voilà pourquoi Jonas dit que la situation particulière dans laquelle se trouve l'organisme vivant est celle de la « **liberté nécessaire** » (“**needful freedom**”).

Cette relation de “needful freedom” entre l'organisme et son environnement est donc **dialectique**, dans le sens où son identité dépend de la **disponibilitié des ressources** dans cet environnement dont les **perturbations** tendent aussi à détruire cette identité.

En passant, de la même manière que Maturana et Varela avait utilisé le terme « **autonomie** » associé à l'expérience humaine pour décrire l'organisation auto-productrice des systèmes vivants,

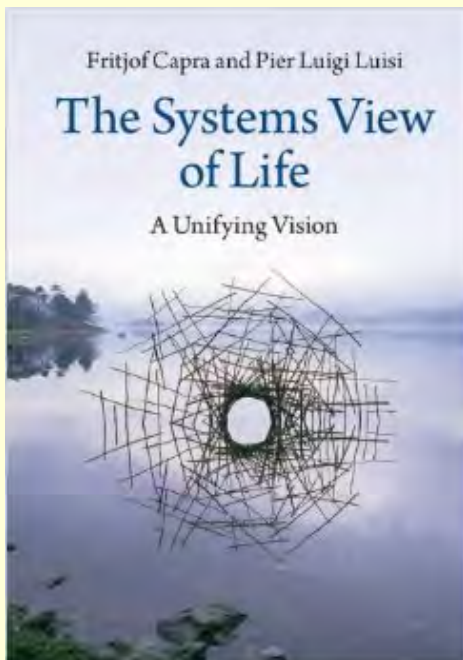
de la même manière, Jonas a utilisé le terme « liberté » associé lui aussi à l'expérience humaine pour décrire **une certaine indépendance de la forme par rapport à la matière qui la constitue.**

[mais personnellement, je préfère de beaucoup autonomy à freedom...!]

Car comme on l'a dit, même si un organisme est un être matériel, son identité n'est pas basée sur la constance de ses éléments matériels puisque **ceux-ci sont constamment renouvelés.**

("Every year, ninety-eight percent of the atoms in your body are replaced.")

Donc seulement au niveau de **la forme ou du pattern** pouvons-nous trouver une constante dans le flux.



- Matter - l'étude de la **matière** : de quoi c'est fait ?
- Life - l'étude de la **forme** : quel est le pattern ?
- Mind - l'activité dynamique : the **process**

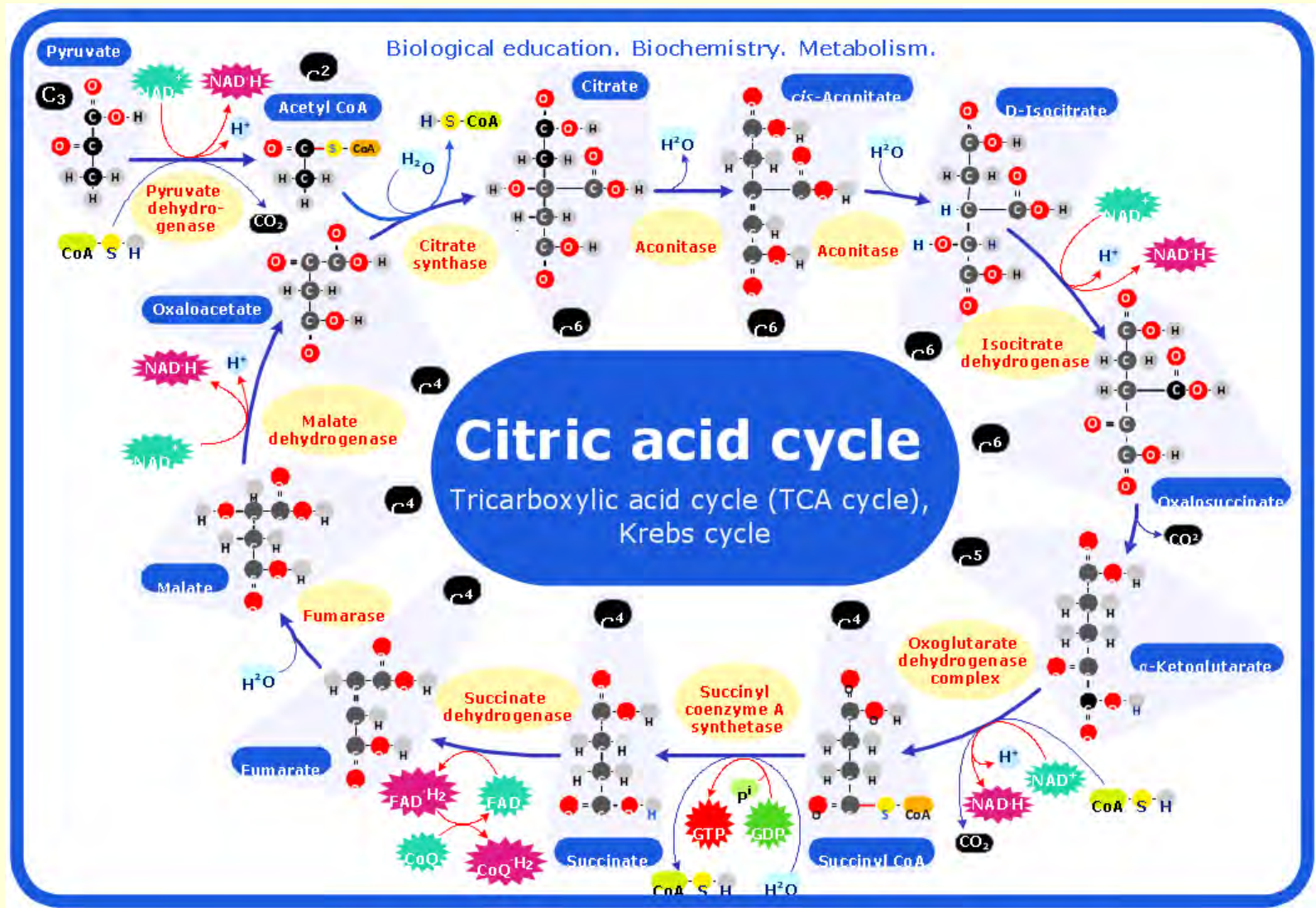
**L'identité** d'un organisme est donc accomplie **dynamiquement** à un **niveau formel**.

L'organisme doit donc constamment changer.  
Il doit manger et excréter sinon il meurt.

Sans ces échanges métaboliques incessants avec le monde,  
il ne peut y avoir **l'émancipation d'un soi dynamique** du monde matériel.

D'où le « needful freedom » de Jonas.

Le **métabolisme** est donc la régénération constante d'un "îlot de forme" dans une mer d'énergie et de matière désordonnées.





Le **métabolisme** est donc la régénération constante d'un "îlot de forme" dans une mer d'énergie et de matière désordonnées.

Le métabolisme établit donc le "soi" avec une identité interne démarquée du monde extérieure (selon certaines normes propres à cette identité) et dont **l'essence est définie par son action**.

La vie est donc un processus "**auto-affirmatif**" qui "**énonce**" sa propre identité et attribue de la signification aux choses à partir de la perspective de cette identité.

La **préoccupation** d'un organisme, son "**intention naturelle**", est donc d'aller de l'avant, de continuer à vivre, de s'affirmer face au désordre et à la non-existence qui l'entoure.



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



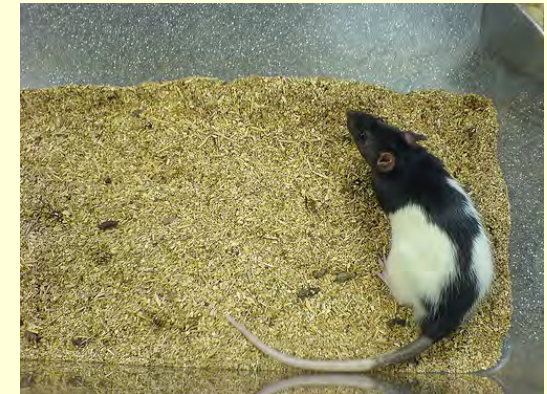
« La seule raison d'être d'un être vivant, c'est **d'être**, c'est-à-dire de **maintenir sa structure**. »

Si l'organisme doit renouveler sa matière pour maintenir son identité, il doit constamment “**viser au-delà de lui-même** », de sa condition présente.

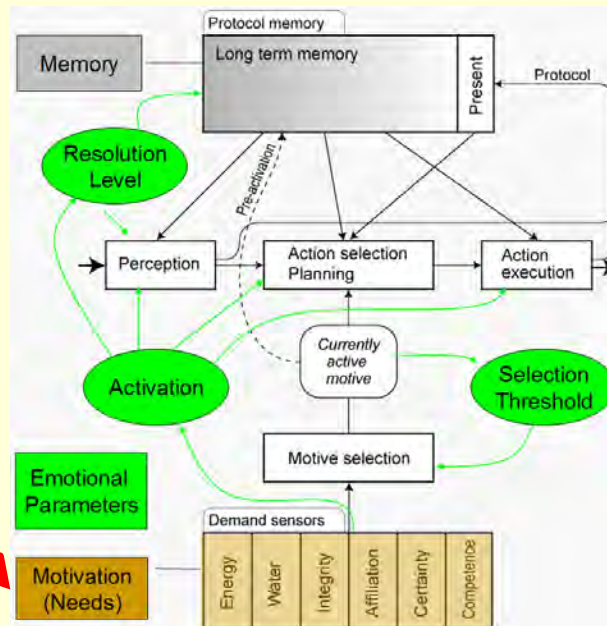
[le “conatus” de Spinoza... l'effort de la vie pour préserver son existence...]

Et cela rejoint certaines caractéristiques de la cognition, comme celle d'être **intrinsèquement concerné par la monde**, d'y chercher et d'y trouver de la **signification**.

En effet, les êtres vivants ont ce désir, **cette curiosité**, **d'explorer leur espace vital** parce qu'ils ont besoin de trouver des éléments pour renouveler leur structure.



Alors que dans le cas des architectures fonctionnalistes cognitivistes, on est toujours obligé de leur adjoindre une petite boîte étiquetée “**motivation**” pour déclencher leur action...



Le métabolisme des processus autopoïétique propulse donc la vie, pour ainsi dire, **en avant et au-delà de sa condition présente** dans le temps et l'espace.

La condition première de la vie en est donc une d'appétit, de besoin et de désir, qui sont essentiellement **affectifs** et "**forward-looking.**"

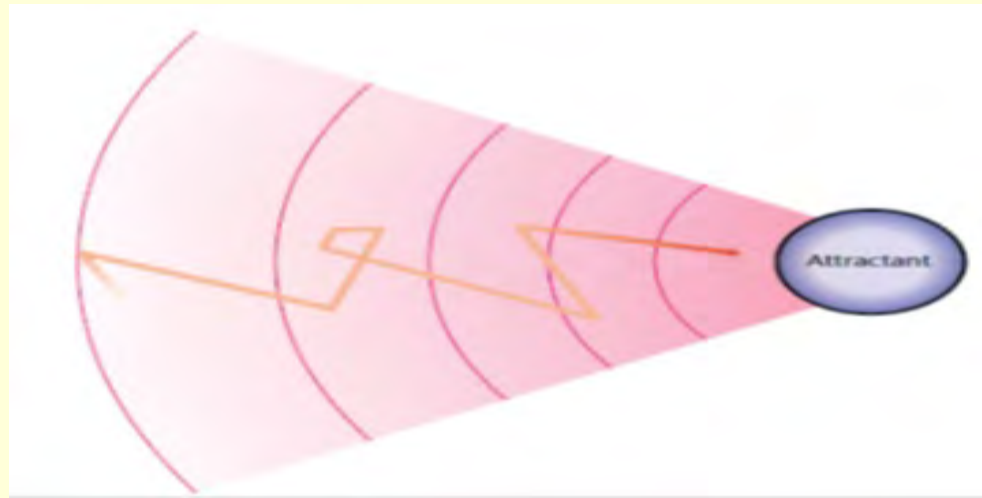
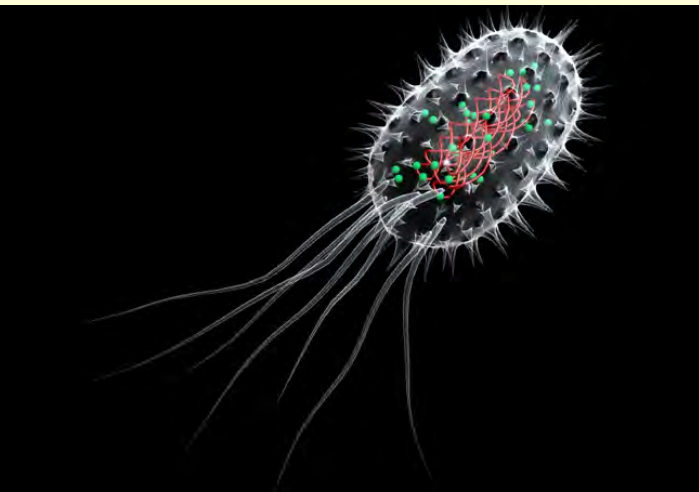
D'où l'idée de **co-émergence** d'un individu et de son environnement.

“ Living beings **shape the world** into meaningful domains of interaction and thereby **bring forth their own environments** of significance and valence.”

On peut prendre l'exemple d'une bactérie mobile qui nage dans un milieu aqueux en remontant un **gradient de sucrose**.

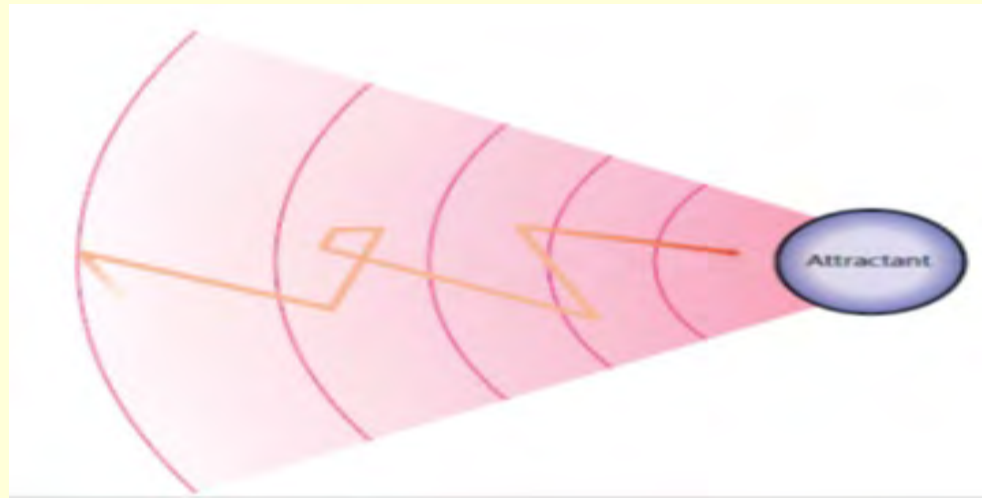
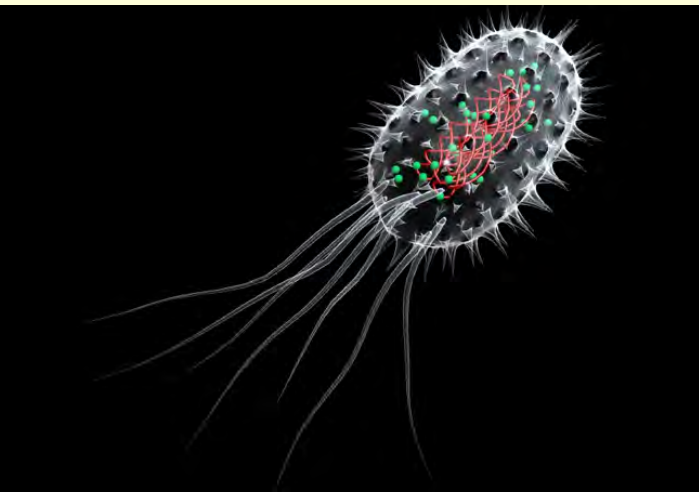
La bactérie tourne au hasard jusqu'à ce qu'elle sente le gradient de molécules de sucre, grâce à des récepteurs sur sa membrane.

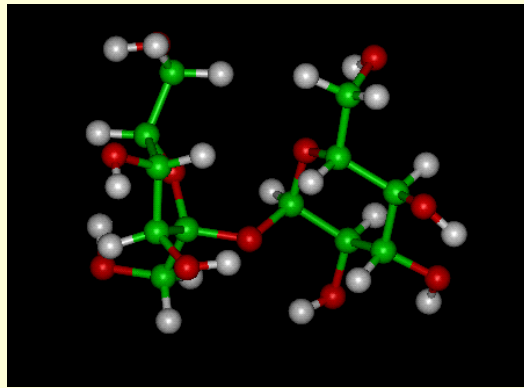
Puis elle va se mettre naturellement à nager pour remonter ce gradient, donc aller vers la source du sucre, pour en avoir plus.



Il se crée donc une **boucle sensorimotrice dynamique** : la façon dont la bactérie bouge (d'abord au hasard, puis en nageant vers la source) dépend de ce qu'elle perçoit, et ce qu'elle perçoit dépend de comment elle bouge.

C'est pourquoi on dit que chaque interaction sensorimotrice et chaque caractéristique discernable de l'environnement **réflète** ou « **énacte** » la **perspective de la bactérie**.

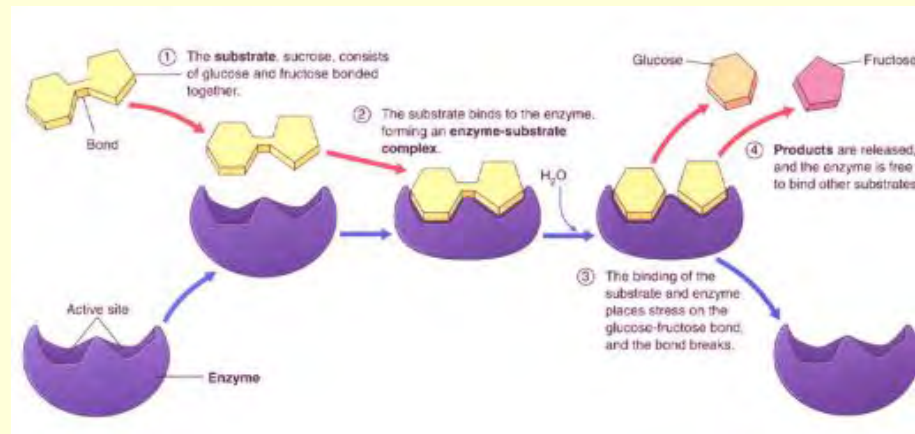


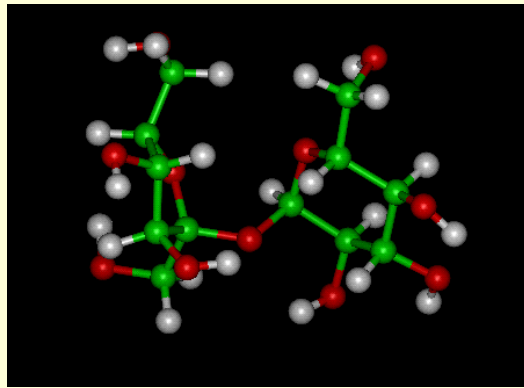


Le point important ici : bien que le **sucrose** est un réel élément de cet environnement physicochimique, son statut comme **aliment**, lui, ne l'est pas.

Le sucrose en tant qu'aliment **n'est pas intrinsèque au statut de sucrose en tant que molécule**. C'est plutôt une caractéristique « relationnelle », liée au métabolisme de la bactérie (qui peut l'assimiler et en soutirer de l'énergie).

sucrose





Le point important ici : bien que le **sucrose** est un réel élément de cet environnement physicochimique, son statut comme **aliment**, lui, ne l'est pas.

Le sucrose en tant qu'aliment **n'est pas intrinsèque au statut de sucrose en tant que molécule**. C'est plutôt une caractéristique « relationnelle », liée au métabolisme de la bactérie (qui peut l'assimiler et en soutirer de l'énergie).

Le sucrose n'a donc pas de signification ou de valeur comme nourriture en soi, mais seulement dans ce milieu particulier que la bactérie amène à exister.

Varela résume ceci en disant que grâce à l'autonomie de l'organisme (par exemple la bactérie), son environnement ou sa niche a un « **surplus de signification** » comparé au monde physicochimique.

Les significations particulières (valeurs positives ou négatives) que l'on retrouve dans ce monde sont donc le **résultat des actions de l'organisme**.

La signification et la valeur des choses ne préexistent donc pas dans le monde physique, **mais sont « éactés »**, mis de l'avant et constitués par les organismes.

Par conséquent, **vivre est un processus créateur de sens**.



En guise de conclusion :

Tiré de :

**Bruineberg : The anticipating brain is not a scientist: The free-energy principle from an ecological-enactive perspective**

(p.6)

“Life and mind share the same basic underlying principles.

**It is exactly this organisational continuity of life and mind that is the starting point of Friston’s free-energy principle,**

suggesting common ground between the free-energy principle and enactive philosophy of biology.

Friston agrees that the defining feature of living systems is the way in which “biological systems [...] **maintain their states and form** in the face of a constantly changing environment” (Friston, 2011, p.92).

**Self-maintenance and selfproduction** are the defining features of **autopoietic** (self-producing) systems, suggesting that there might be an intimate relation between free-energy minimization and autopoiesis as a defining characteristic of life”