



Origine de la vie

Comment? où? quand?

Emmanuelle Javaux
ULg

Qu'est-ce-que la vie?

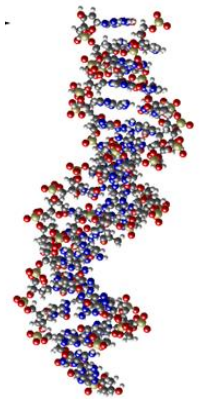
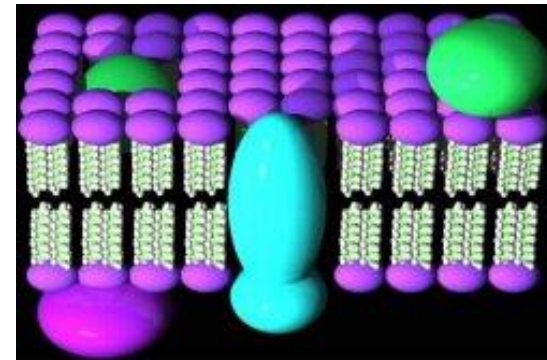


De la matière organisée...



Les ingrédients de la vie

- La vie telle qu'on la connaît est basée sur au moins une cellule (virus?)
- Une cellule comprend:
 - Des macromolécules (CHONPS)
 - Membrane (lipides)
 - Acides nucléiques ADN/ARN
 - Protéines (chaines d'acides aminés)
 - Polysaccharides
 - ATP (énergie)
 - Eau (environ 70 % en masse)
 - Micronutriments : métaux

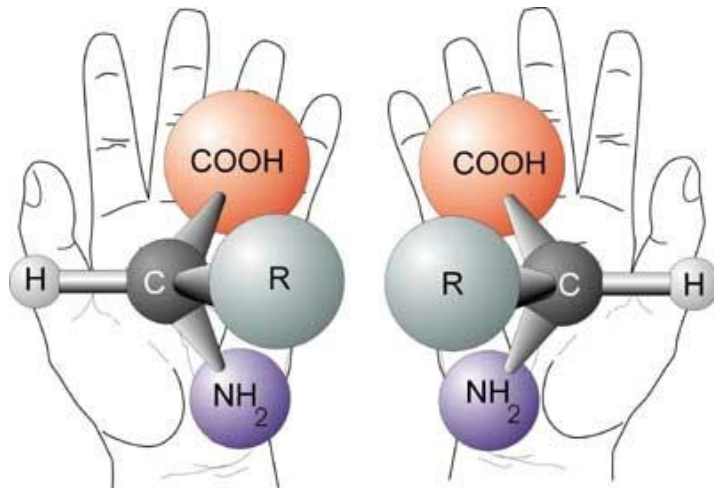


MACRONUTRIENTS: Indispensables à la vie, éléments majeurs	ROLE
C (18.5%) H (9.5%) O (65%) N (3.3%)	dans tous les types de macromolécules: acides nucléiques (ADN, ARN), protéines, polysaccharides, lipides, acides aminés
P (1%)	Synthèse d'acides nucléiques et phospholipides (dans membranes)
S (0.3%)	Acides aminés, vitamines
K Mg Ca	enzymes, stabilisation de ribosomes, membranes cellulaires, acides nucléiques
Fe	Rôle majeur dans respiration cellulaire
MICRONUTRIENTS : METALS Indispensables à la vie, éléments en traces (<0.01%)	ROLE
Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Se, W, V, Zn	rôle structurel dans enzymes, pas tous nécessaires à toute forme de vie

Les ingrédients chimiques de la vie

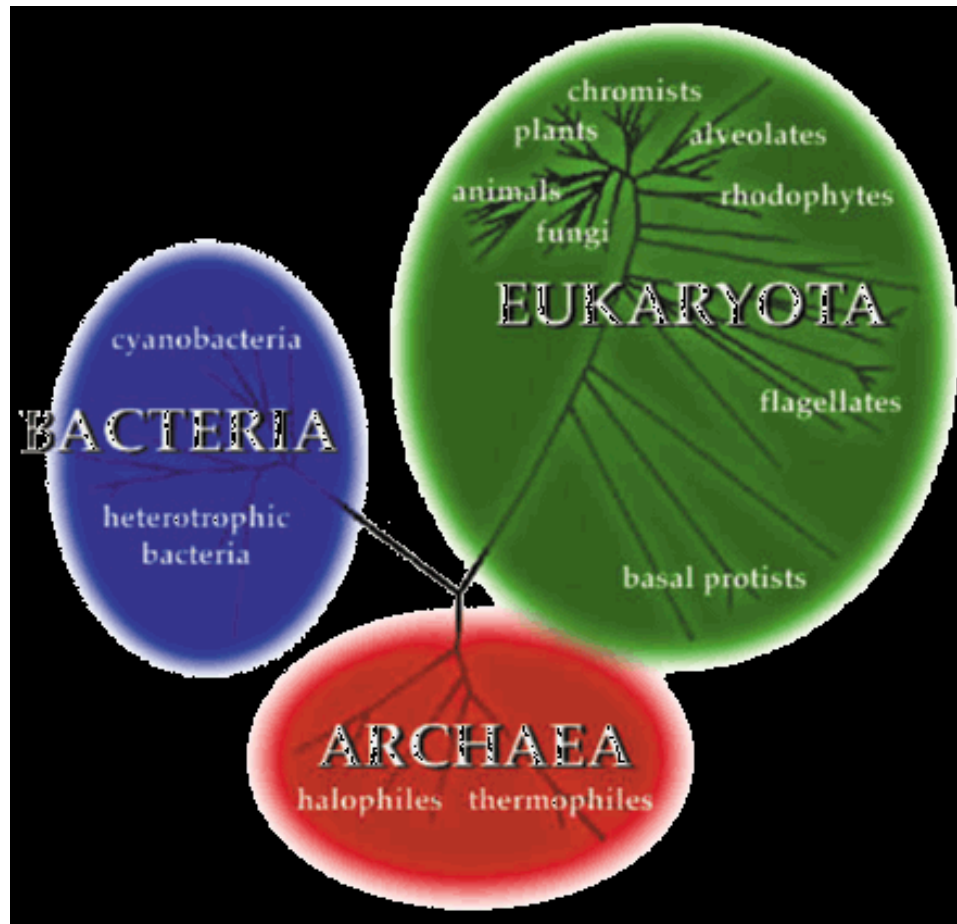
Les composants

- La vie utilise 20 acides aminés (L), alors qu'il en existe plus de 70 dans la nature
- homochiralité

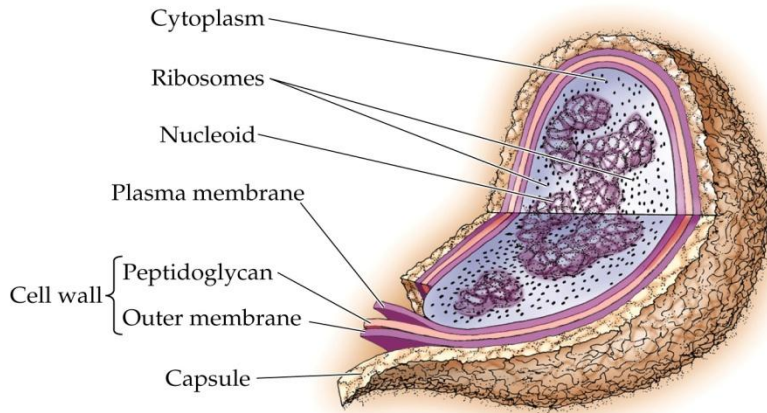


Météorite Murchison
70 aa

Les trois domaines de la vie

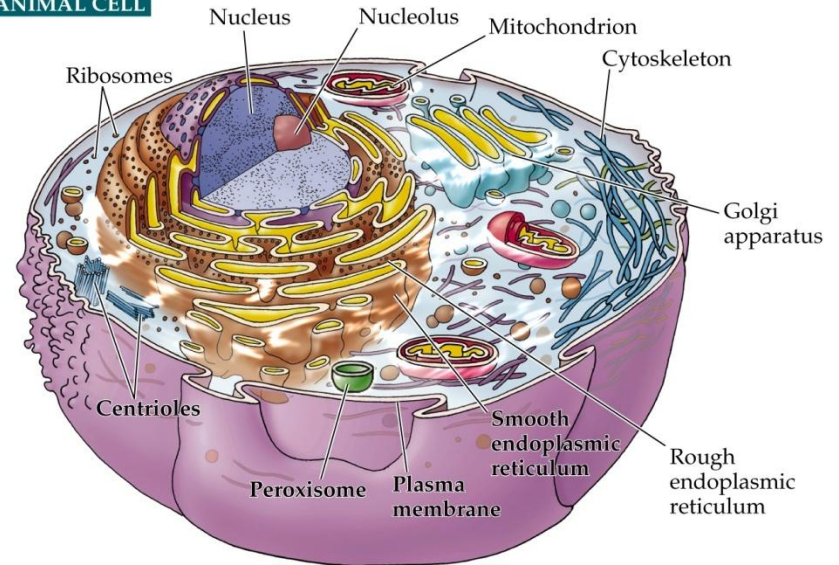


Cellule procaryote / eucaryote



© 2001 Sinauer Associates, Inc.

AN ANIMAL CELL



© 2001 Sinauer Associates, Inc.

Procaryote:

Structure simple
Métabolismes complexes
Et diversifiés

Eucaryote:

Structure complexe

Mais aussi..



- Quelle est la différence entre un lapin et une voiture?

- Difficile de définir la vie
- Exceptions à chaque propriété caractérisant la vie

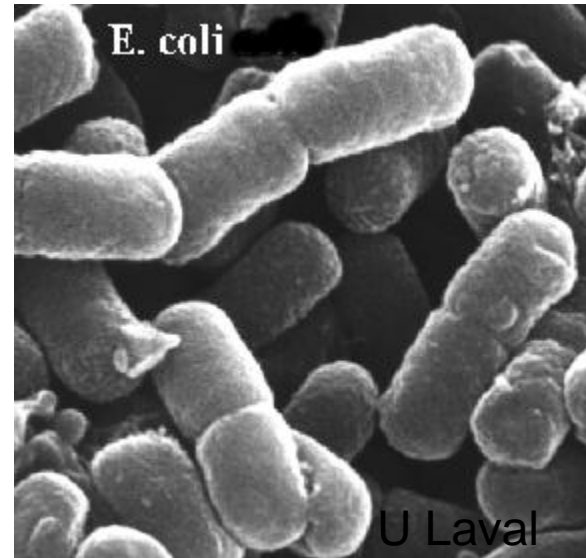
Propriétés de la vie

- Ordre: nécessaire mais pas suffisant
 - ex: livre



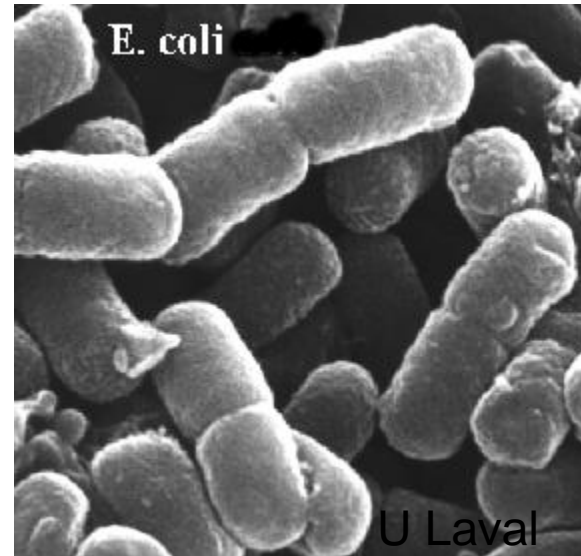
Propriétés de la vie

- Reproduction:
 - Division binaire de bactéries
 - Reproduction sexuée

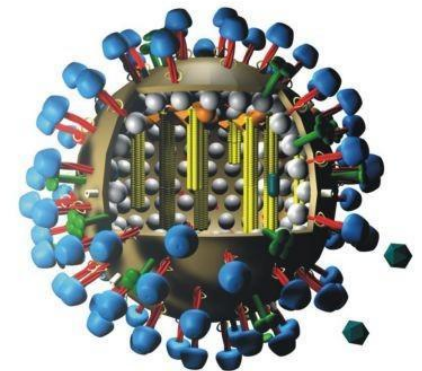


Propriétés de la vie

- Reproduction:
 - Division binaire de bactéries
 - Reproduction sexuée



- Mais
 - ex: mule (cheval + âne) est stérile
 - ex: virus se reproduit par infection d'un autre organisme, pas seul



Virus grippe
Futura-sciences

Propriétés de la vie

- Croissance et développement



Propriétés de la vie

- Croissance et développement



- Mais
 - ex: feu croît et s'étend dans forêt



Propriétés de la vie

- Utilisation d'énergie pour se maintenir, se reproduire et croître

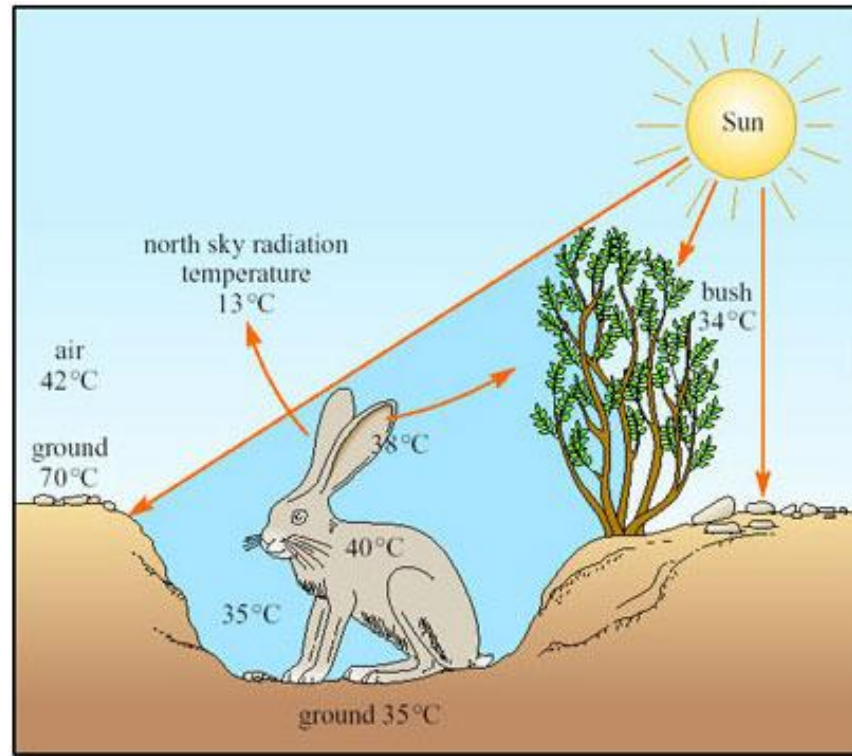
Propriétés de la vie

- Utilisation d'énergie pour se maintenir, se reproduire et croître
 - Mais ex: lampe, ...



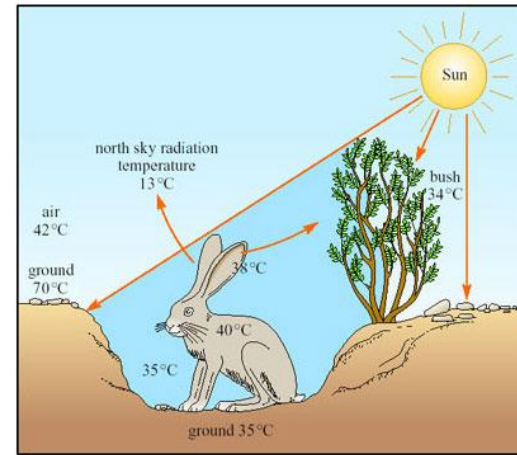
Propriétés de la vie

- Réponse à l'environnement

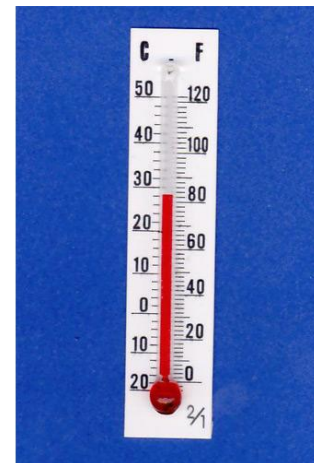


Propriétés de la vie

- Réponse à l'environnement



- Mais ex: mercure dans thermomètre



Propriétés de la vie

- **Adaptation évolutive**

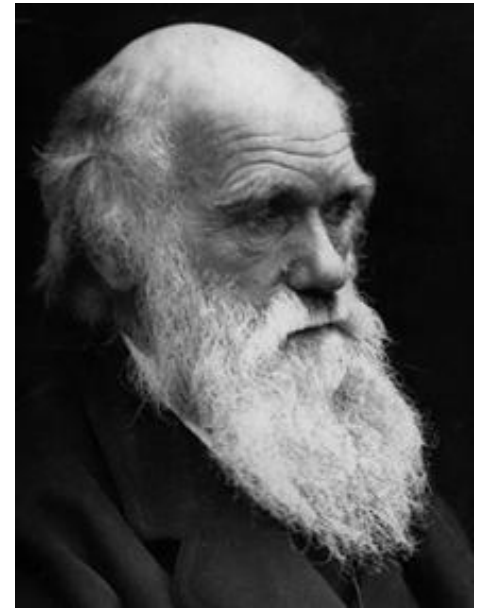
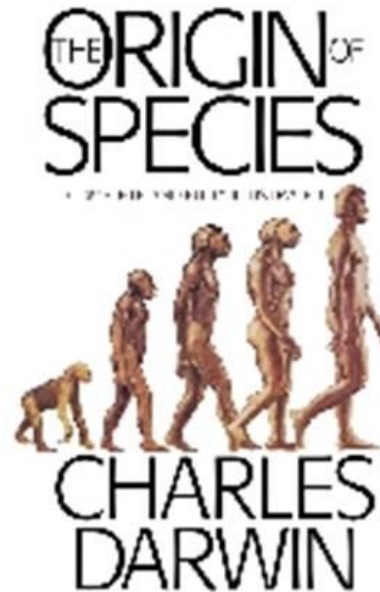
Darwinisme 1859

- **1-surproduction et “struggle for survival”**

Une population peut produire plus de descendants qu’il n’y a de ressources

→ Lutte pour la survie parmi les individus d’une population

2009!

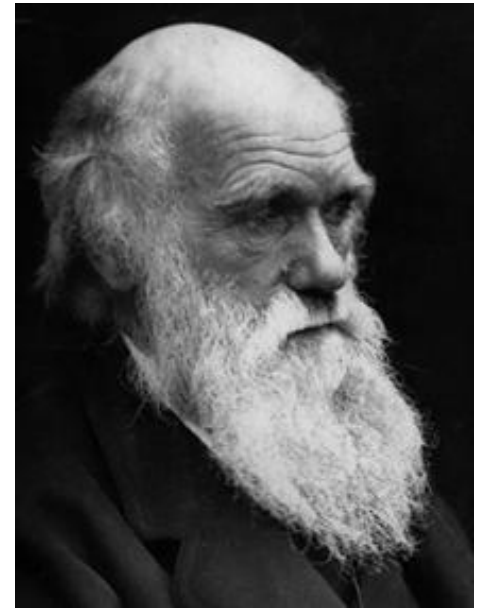
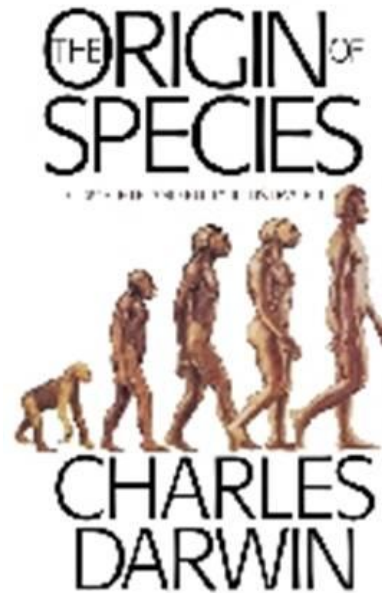


Darwin 1809

Propriétés de la vie

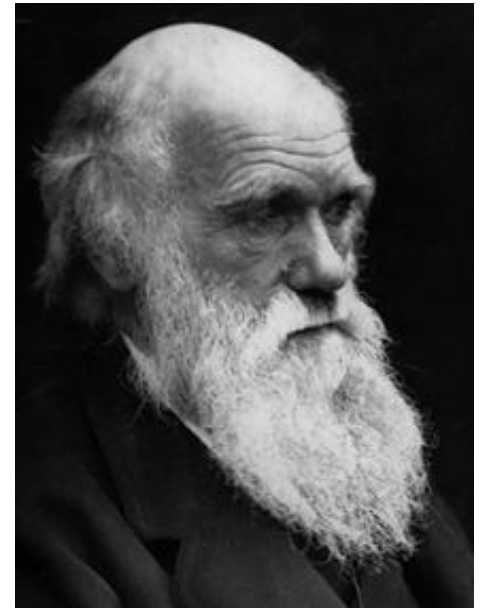
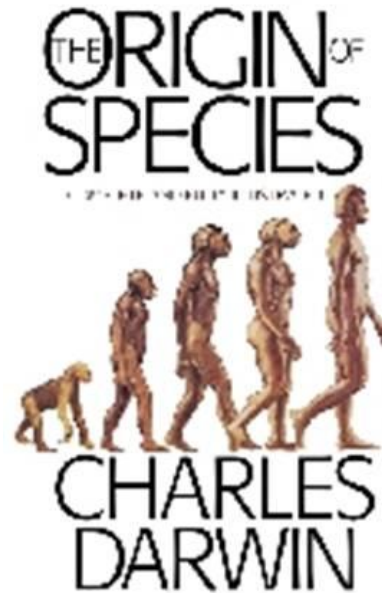
2-variations individuelles

- Chaque individu est différent des autres
- Certains sont plus compétitifs pour la recherche de nourriture et autres ressources

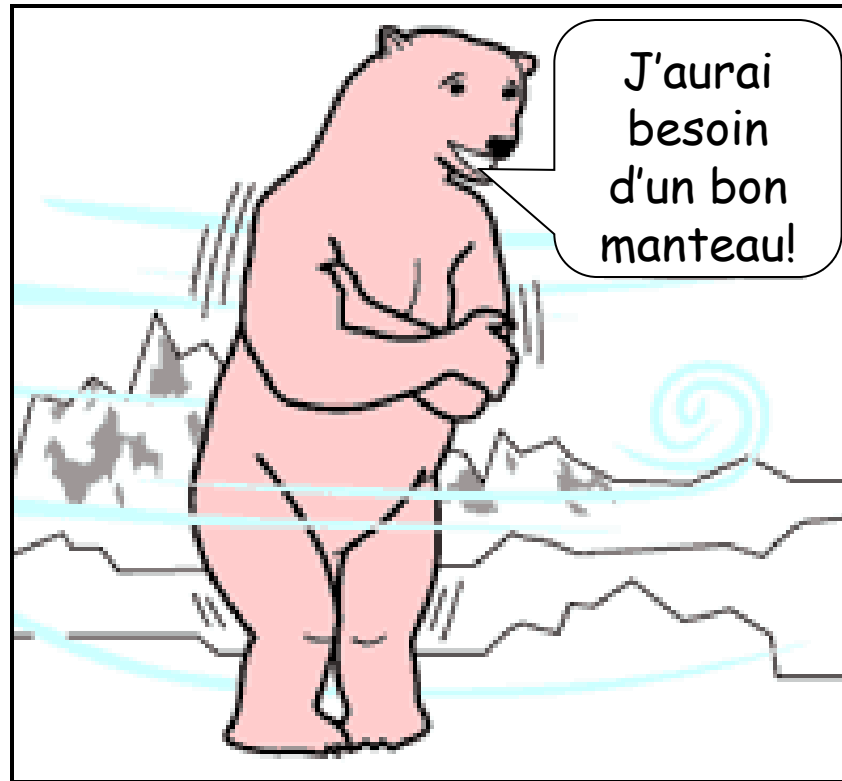


Propriétés de la vie

- **1 (lutte) + 2 (variations) → Succès inégal de reproduction**
- Les individus plus aptes à survivre et se reproduire (par hasard!) vont laisser plus de descendants
- Les traits hérités permettant la survie et reproduction vont devenir de plus en plus communs dans les générations successives
- **Sélection naturelle**
→ Espèce change en réponse à l'environnement, en favorisant les traits améliorant la reproduction



L'évolution ne fonctionne pas comme cela!



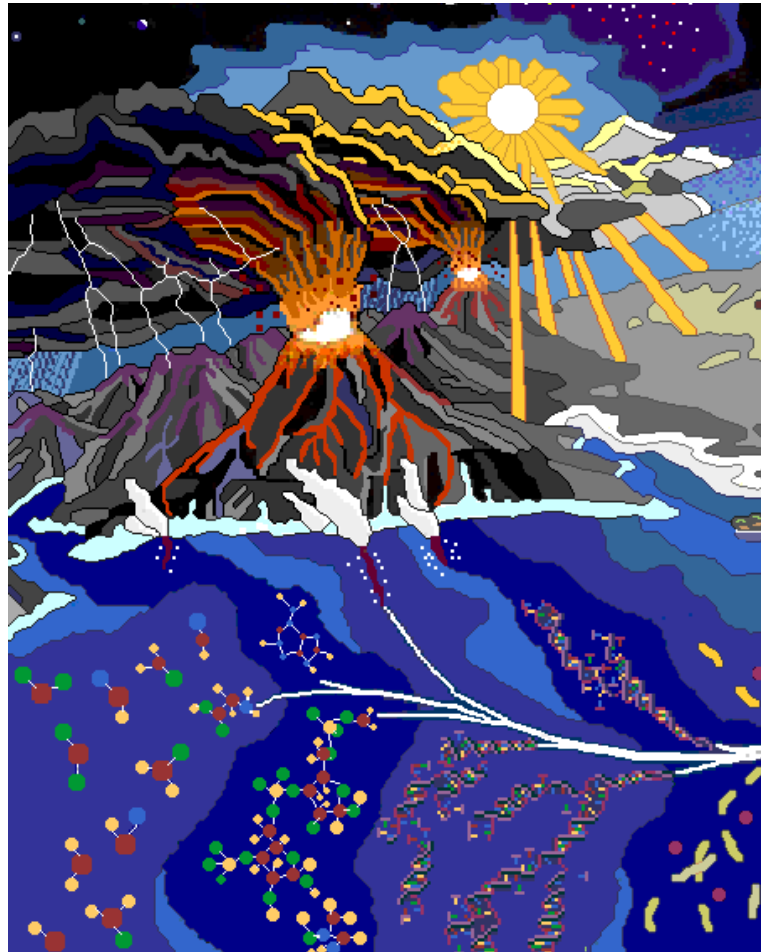
Vie =?

- Peut se reproduire et évoluer par sélection naturelle
 - Mais ex: programmes informatiques?

Qu'est-ce-que la vie?



Comment?



La baguette magique

- Création
- non-science: hypothèse ne peut pas être testée!



Génération spontanée

Pendant très longtemps les choses étaient simples :

- Aucune séparation entre le monde végétal et le monde minéral
- Génération spontanée des organismes vivants



Expériences de Van Helmont
Bruxellois, alchimiste, chimiste, médecin
(1648: création de souris en 21 jours!)

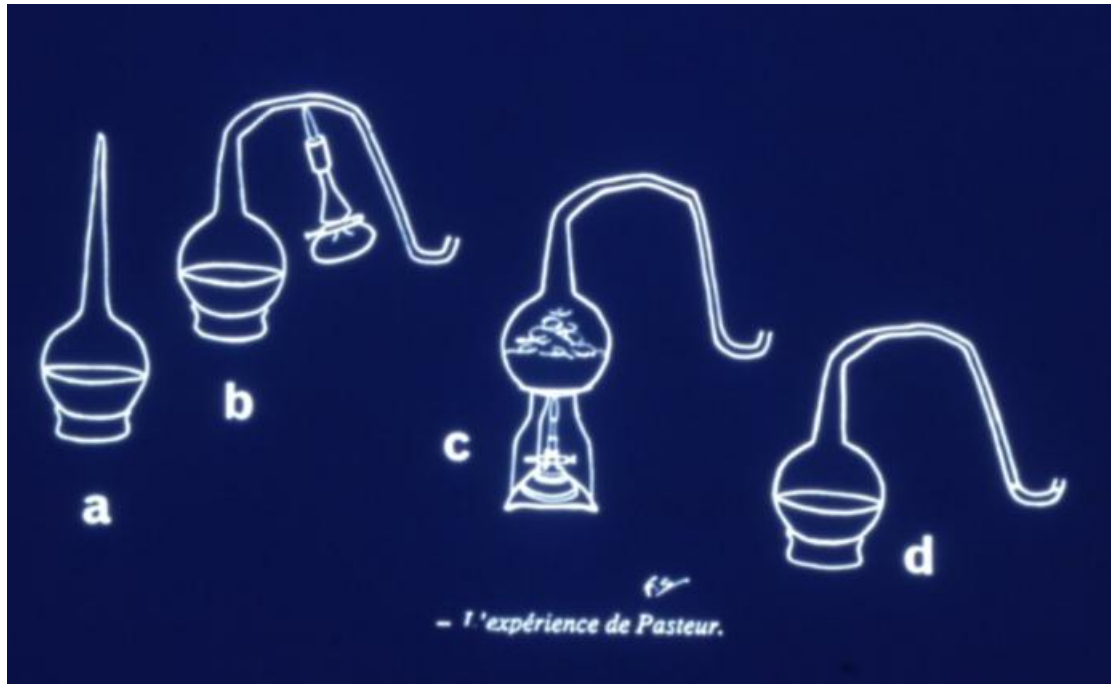
Réfutation de la théorie de la génération spontanée



1862 : Louis Pasteur remporte le prix de l'académie des sciences en réfutant l'hypothèse de la génération spontanée du vivant grâce à son expérience des ballons en col de cygne.

Lorsqu'une solution est convenablement stérilisée et isolée de toute contamination de microorganismes, elle reste stérile indéfiniment.

Réfutation de la théorie de la génération spontanée



a : solution (eau + sucre, ou eau + levure par exemple).

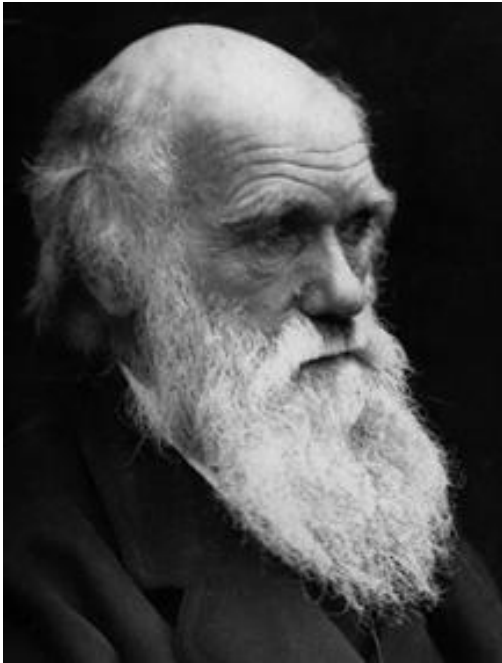
b : flacon façonné en col de cygne

c : ébullition.

d : condensation de la vapeur dans le col : fermeture stérile du flacon

Aucune prolifération bactérienne jusqu'à l'ouverture du flacon

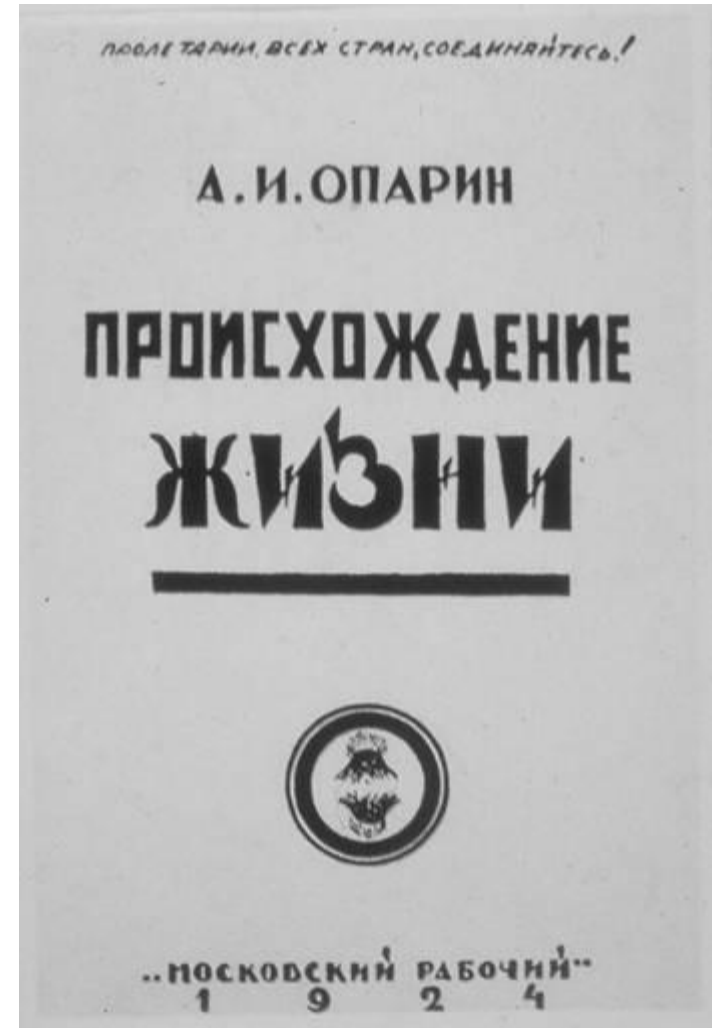
1871 : Charles Robert Darwin, dans une lettre à un ami (J.D. Hooker)



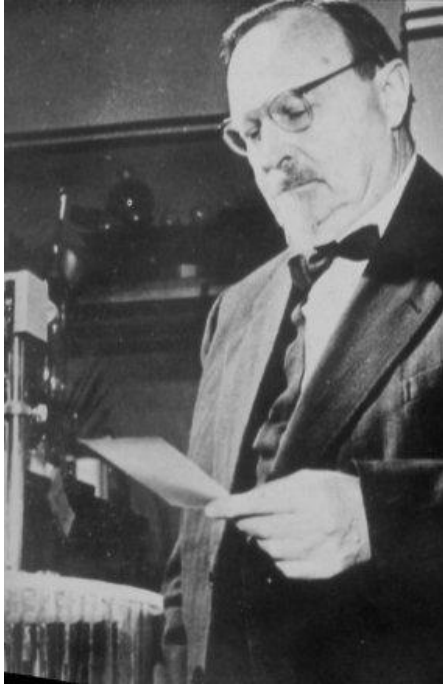
*“It is often said that all the conditions for the first production of a living organism are now present, which could ever have been present. But if (& oh what a big if) we could conceive **in some warm little pond with all sorts of ammonia and phosphoric salts, -light, heat, electricity & C present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes,** at the present day such matter would be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed”*

1924 : Aleksandr Ivanovich Oparin (1894-1980)

- **1924** : Aleksandr Ivanovich Oparin
- ***The Origin of life***
- Concept d'évolution chimique
- Dans une atmosphère oxydée dans la première édition (1924) puis dans un environnement réduit dans la seconde (1938).



1924 : Aleksandr Ivanovich Oparin (1894-1980)



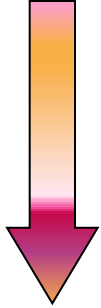
*“At first we found **carbon scattered in the form of separate atoms, in the red hot stellar atmospheres.** We then found it as a component of hydrocarbons which appeared on the surface of the Earth.(...) **In the waters of the primitive ocean** these substance formed more complex compounds. Proteins and similar substance appeared.(...) [They] (...) **acquired a more and more complex and improved structure and were finally transformed into primary living beings** – the forbears of all life on Earth.”*

Origine unique de la vie sur Terre

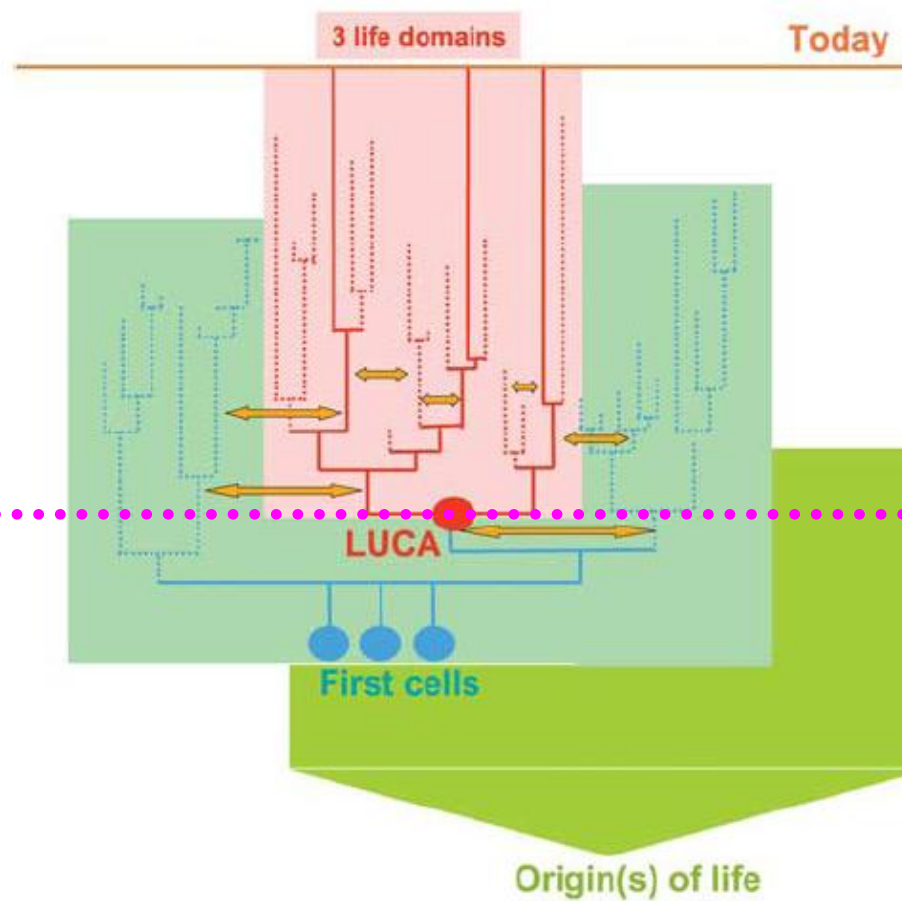
- Toutes les formes de vie sont composées de **macromolécules basées sur le carbone**
 - **ADN et ARN** sont universels
 - Seulement **20 acides aminés** sont utilisés par toutes les formes de vie, et seulement les énantiomères **L**
 - L'**ATP** est la molécule de stockage d'énergie universelle, utilisée par toutes les formes de vie
- l'ancêtre commun des trois domaines A, B, E (cénancêtre ou LUCA ou LCA) avait ces caractéristiques et était donc complexe!

Origines de la vie

Top-down
(vie fossile, génétique)



?



Today

3 life domains

LUCA

First cells

Origin(s) of life

?

(Chimie prébiotique)

Bottom-up

Minéraux :

sources d'éléments, catalyseurs, surfaces de réaction, disponibles sur la Terre primitive

- Minéraux basaltiques Si, O, Fe
- Apatite Ca, PO₄
- Phyllosilicates Si, Al, O, Mg, K; favorise polymérisation
- Pyrite FeS₂; source de réducteur
- Calcite CaCO₃; surfaces chirales
- Quartz SiO₂; surfaces chirales

Sources d'énergie disponibles sur la terre primitive

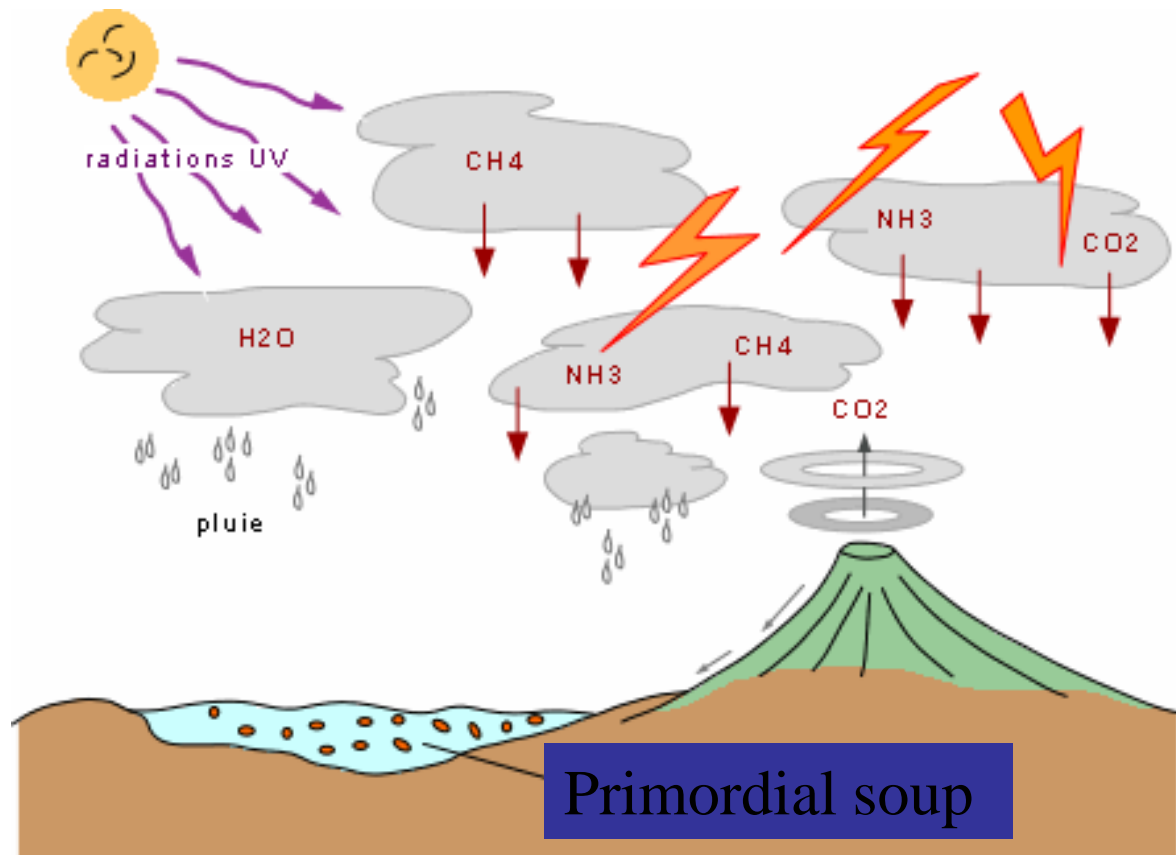
- **Électrique** (éclairs)
- **Lumineuse**
 - UV: détruit liens chimiques
 - Visible: utilisable avec pigments
- **Thermique** (chaleur anhydre): condensation, polymérisation
- **Chimique** (liaisons)
- **D'oxydo-réduction** (transfert d'électrons, requiert membrane pour capturer l'énergie libérée)
 - Donneurs d'e- (réducteur): H_2 , Fe_2+ (volcanisme, dissolution minéraux)
 - Accepteurs d'e- (oxydant): CO_2 , CO , SO_3- , S^0 (volcanisme, dissolution minéraux)
- **Chimio-osmotique**: transport d'électrons couplé à gradient de protons (requiert membrane)

Origine hétérotrophe froide

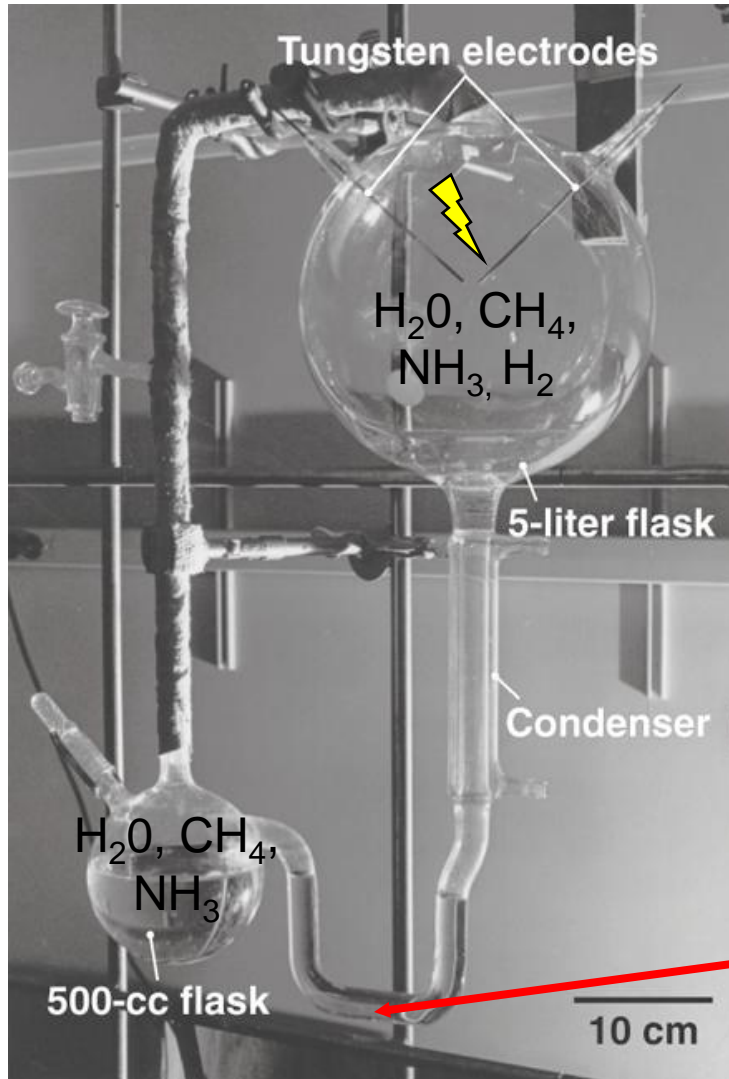
(hétérotrophie: synthèse de composants cellulaires à partir de molécules organiques de l'environnement)



La soupe primordiale froide (Oparine-Haldane, 1920's)



Expériences de chimie prébiotique Stanley Miller & Urey, 1960's



Orig Life Evol Biosph (2008) 38:105–115
DOI 10.1007/s11084-007-9120-3

PREBIOTIC CHEMISTRY

A Reassessment of Prebiotic Organic Synthesis in Neutral Planetary Atmospheres

H. James Cleaves • John H. Chalmers •
Antonio Lazcano • Stanley L. Miller • Jeffrey L. Bada

$CO_2 + N_2$ atmosphere
+ oxidation inhibitors (Fe^{2+})

Sugars, amino acids, bases,
Carboxylic acids

table 3-6

Some Products Formed under Prebiotic Conditions

Carboxylic acids	Nucleic acid bases	Amino acids	Sugars
Formic acid	Adenine	Glycine	Straight and branched pentoses and hexoses
Acetic acid	Guanine	Alanine	
Propionic acid	Xanthine	α -Aminobutyric acid	
Straight and branched fatty acids (C ₄ -C ₁₀)	Hypoxanthine	Valine	
Glycolic acid	Cytosine	Leucine	
Lactic acid	Uracil	Isoleucine	
Succinic acid		Proline	
		Aspartic acid	
		Glutamic acid	
		Serine	
		Threonine	

Source: From Miller, S.L. (1987) Which organic compounds could have occurred on the prebiotic earth? *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* **52**, 17-27.

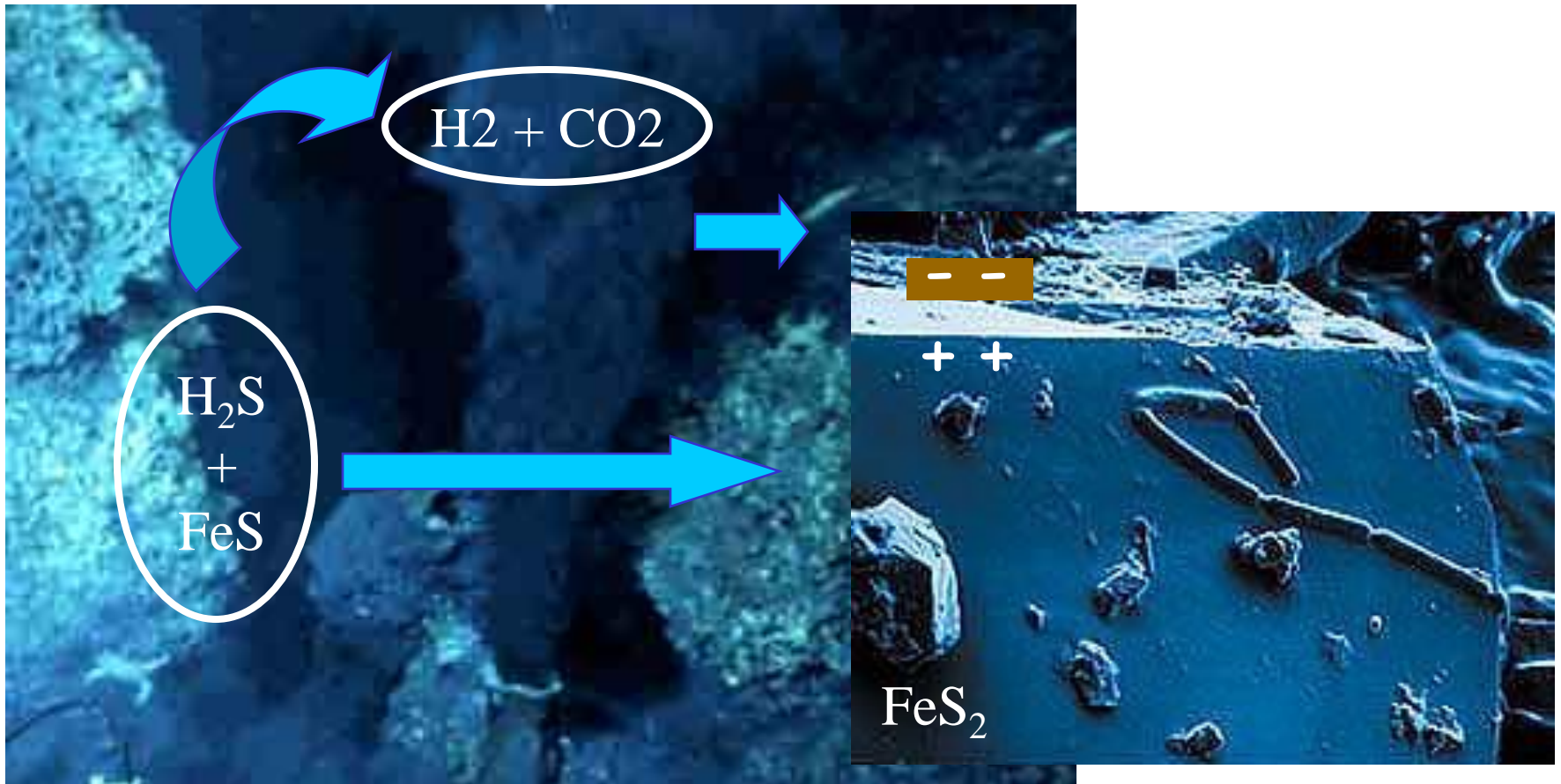
Origine autotrophe chaude

(autotrophie: synthèse de molécules organiques pour biosynthèse à partir de CO_2 , CO , formate HCOO^-)



Énergie des réactions chimiques à l'interface minéral/eau est utilisée pour la fixation du carbone (Wächterhäusser, 1988)

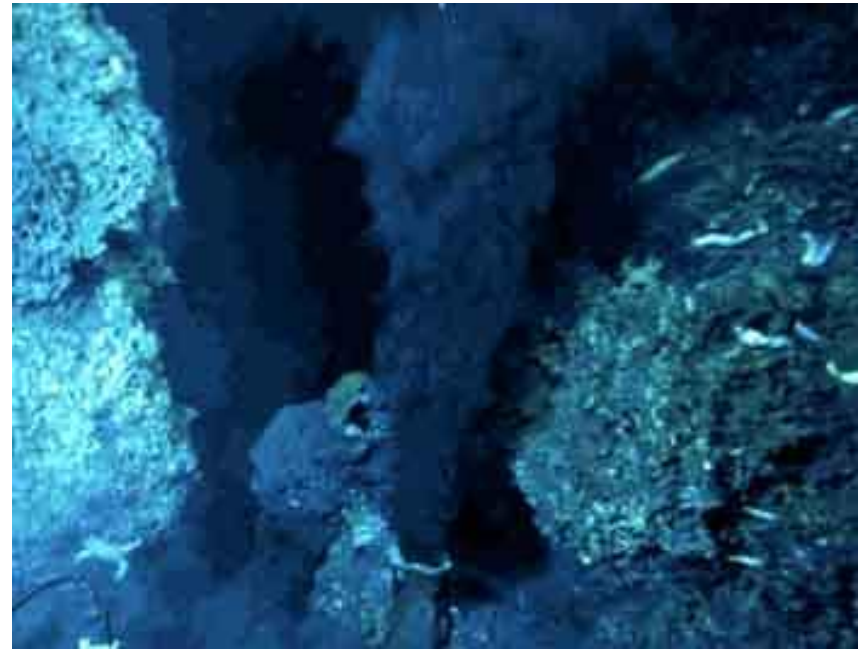
Croissance du film organique



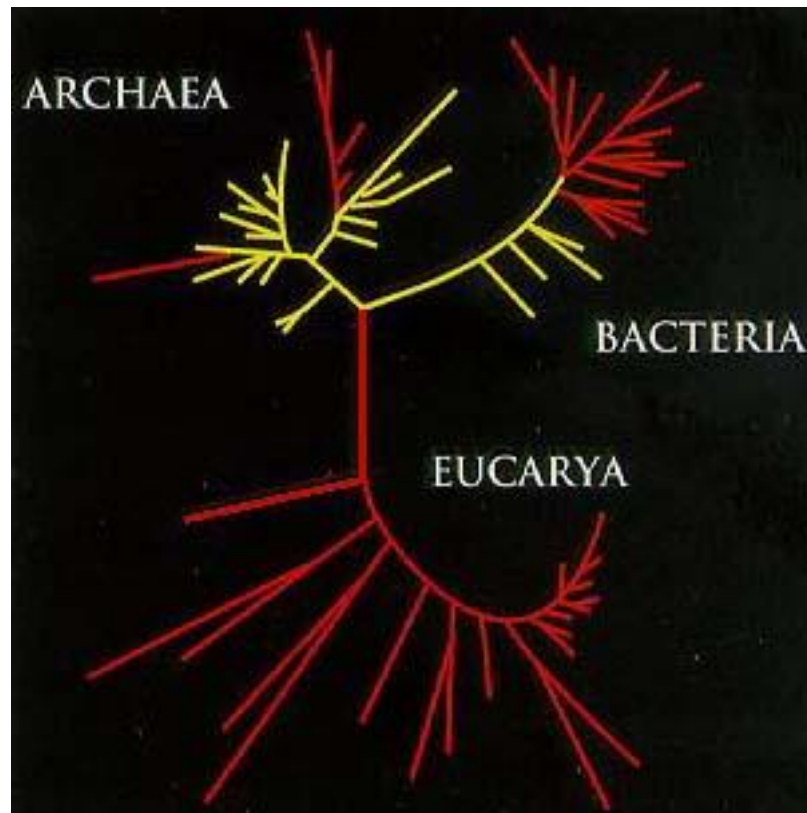
Croissance du minéral

origine chaude dans les sources hydrothermales

- Depuis l'Hadéen chimiosynthèse
- protection contre UV
- hyperthermophiles et chemoautotrophes



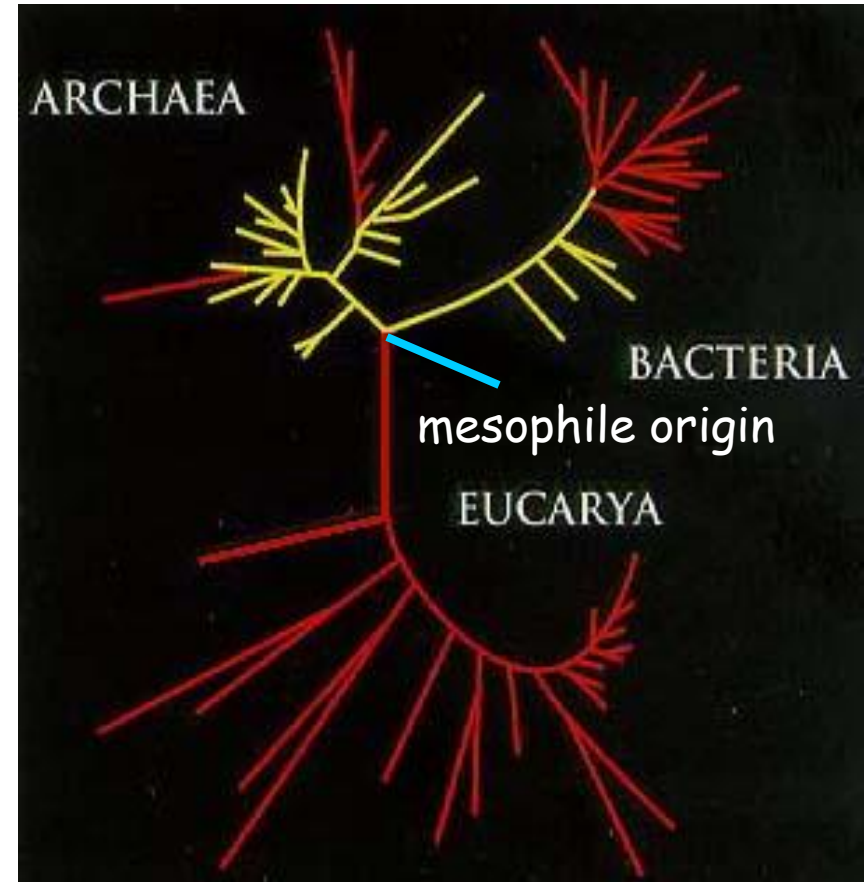
Arbre de la vie



— hyperthermophiles

mais..

- hyperthermophiles sont évolués !
- Instabilité des aa et ARN à haute T
- Courte Activité des sources



ailleurs?



Panspermie

- Svante Arrhenius 1909: spores dispersées d'un système solaire à l'autre
- Lord Kelvin (1824-1907): spores transportées dans l'espace par des météorites entre systèmes (?), au sein d'un système (ok)

Abondance des éléments dans notre galaxie

sur 100 000 atomes:

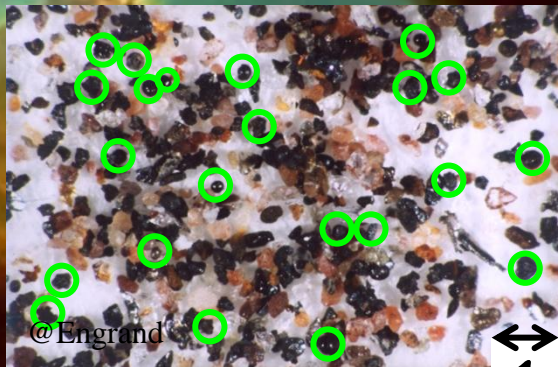
^1H	92000
^4He	7800
^{16}O	60
^{12}C	20
^{20}Ne	10
^{14}N	8

L'eau et la matière organique devraient être abondants
et ils le sont!

➤ 200 molécules organiques
détectées
dans les nuages interstellaires

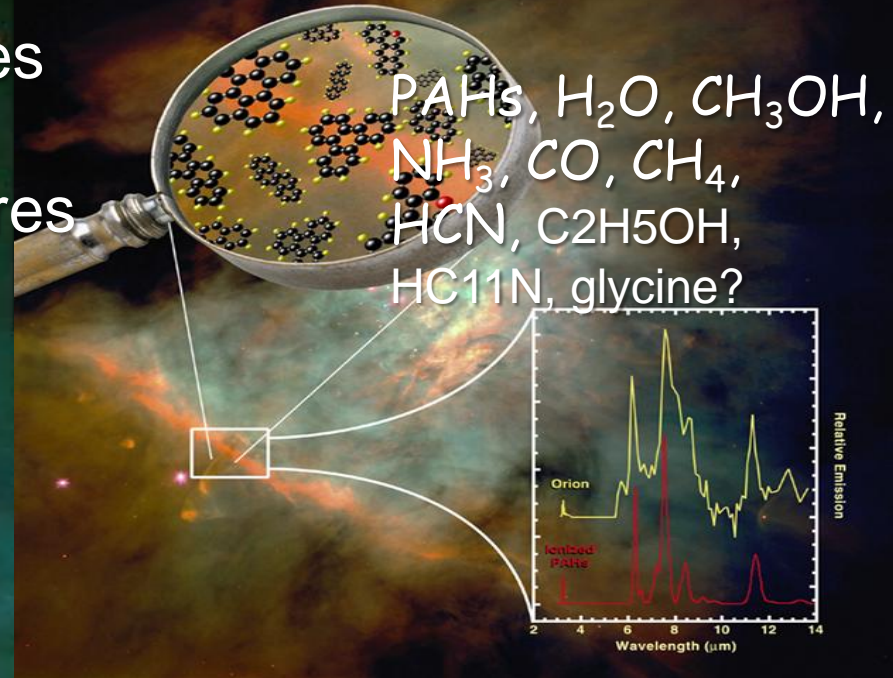
dans les comètes

dans les chondrites
(aa avec ee ~15%)

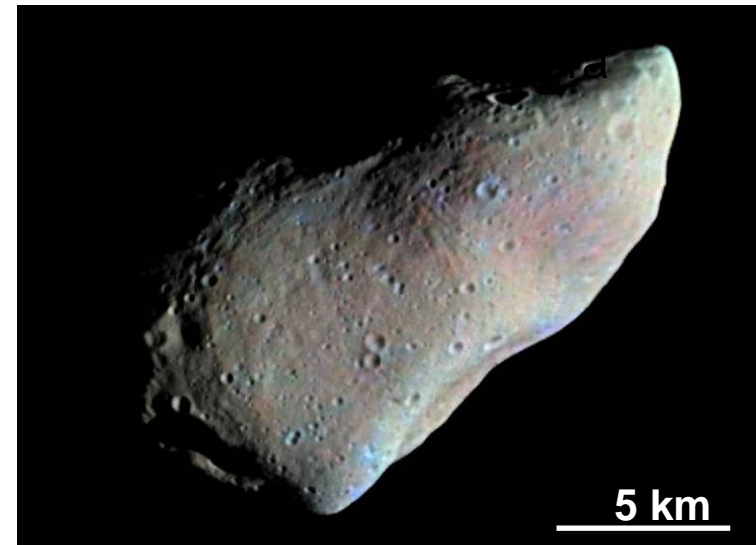
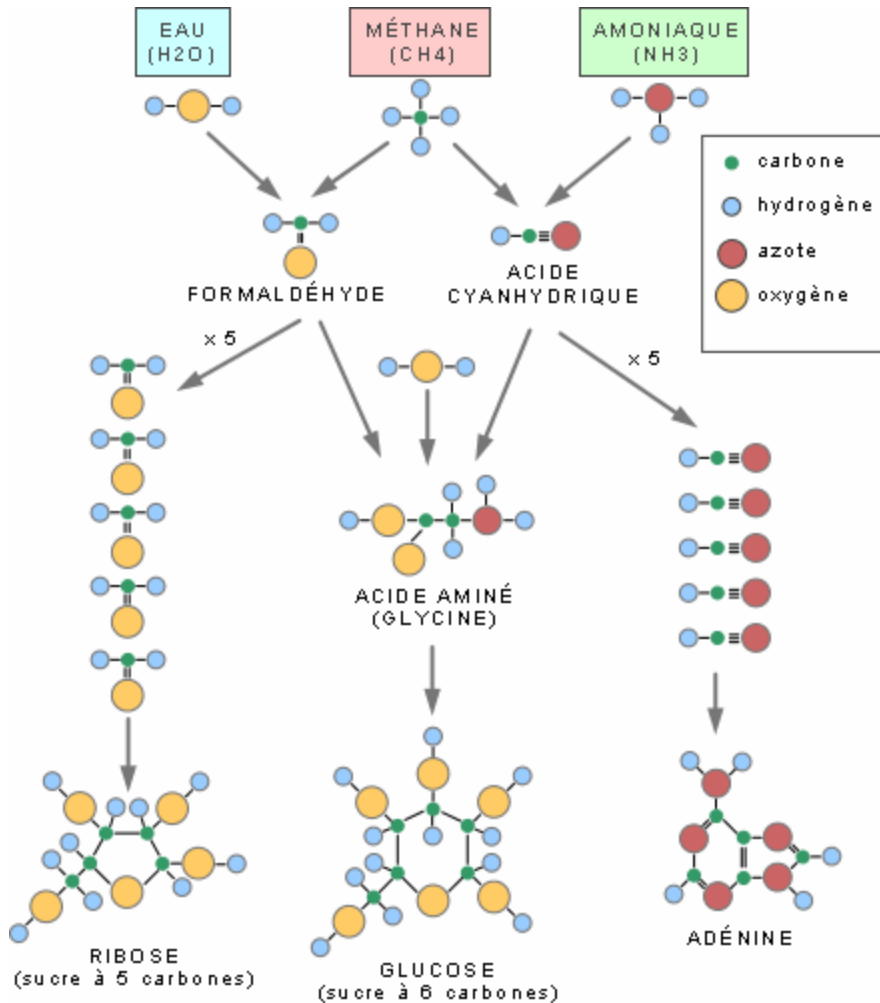


@Engrand

1 mm



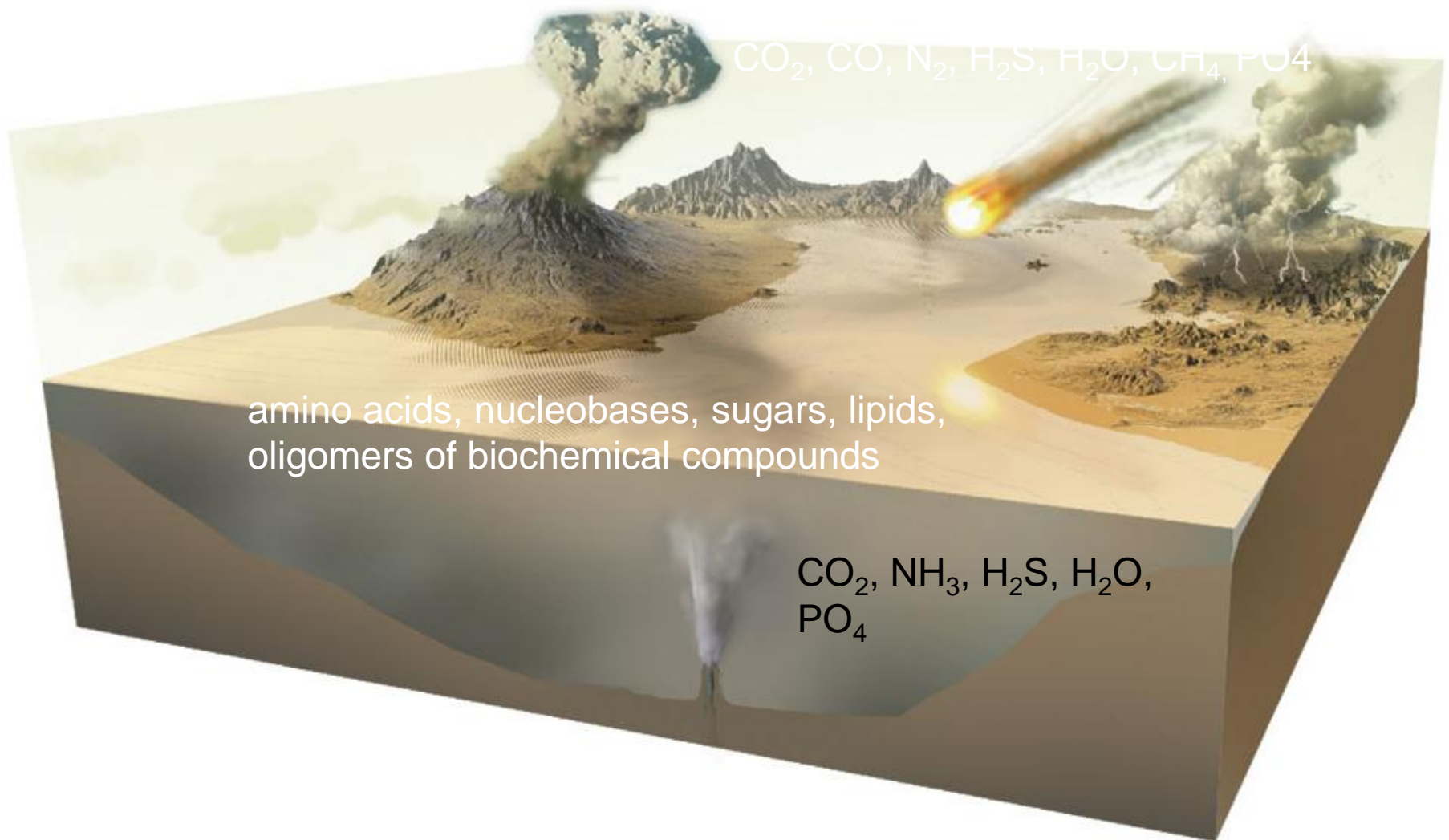
Matière organique dans l'espace

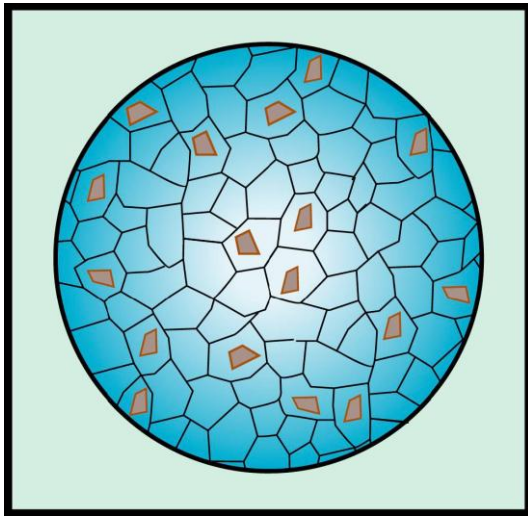


Rôle des météorites dans l'apparition de la vie ?... Et dans la formation des océans



conditions extrêmes de l'origine de la vie





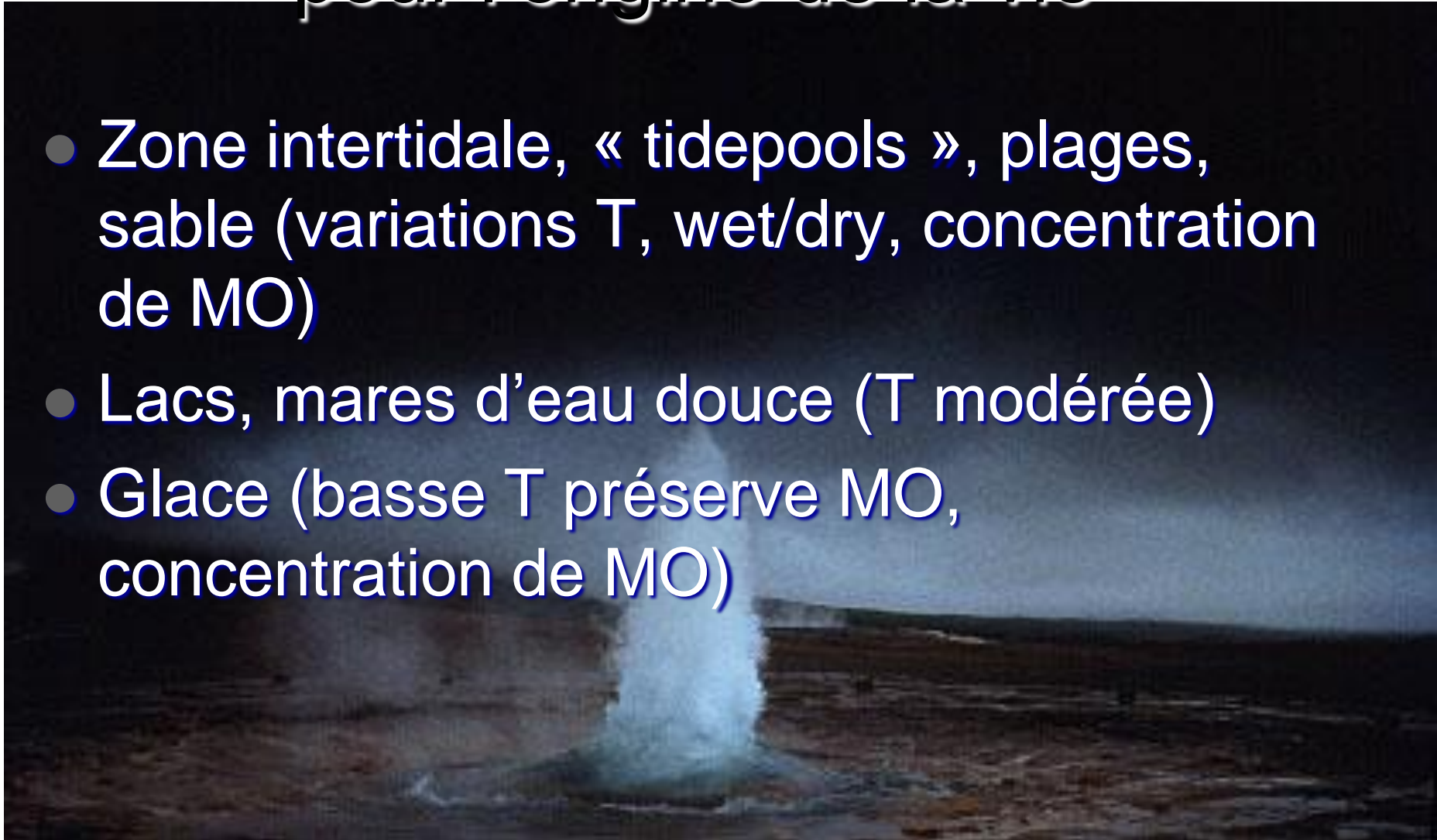
Ice and fire: “Islande”

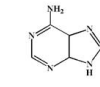
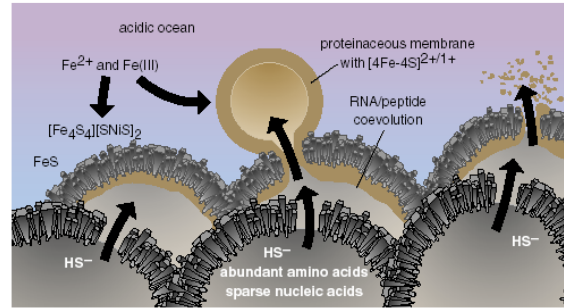
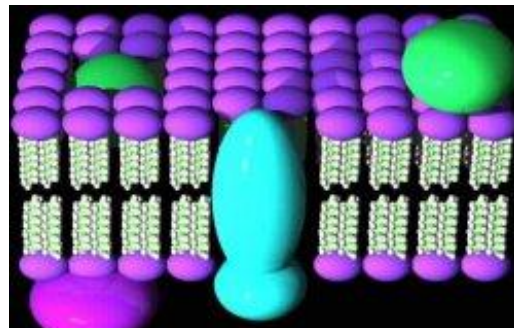
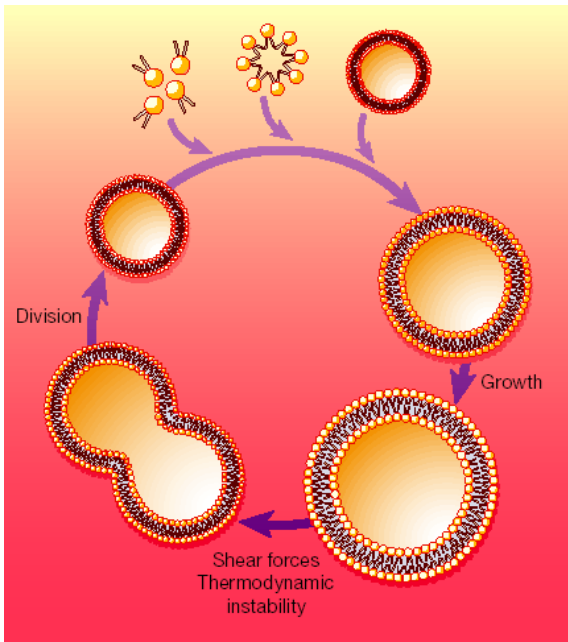


- Chaud:
 - formation de briques (mais fragiles), réaction à la surface de minéraux
- Froid:
 - préservation de molécules et polymérisation

Autres sites possibles en surface pour l'origine de la vie

- Zone intertidale, « tidepools », plages, sable (variations T, wet/dry, concentration de MO)
- Lacs, mares d'eau douce (T modérée)
- Glace (basse T préserve MO, concentration de MO)





HCN



CH_3OH



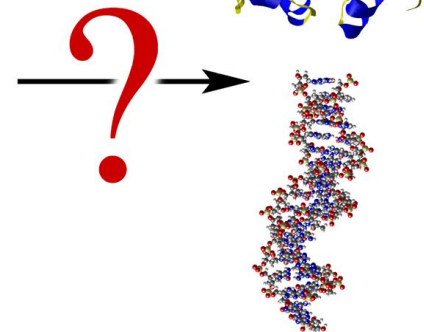
CO



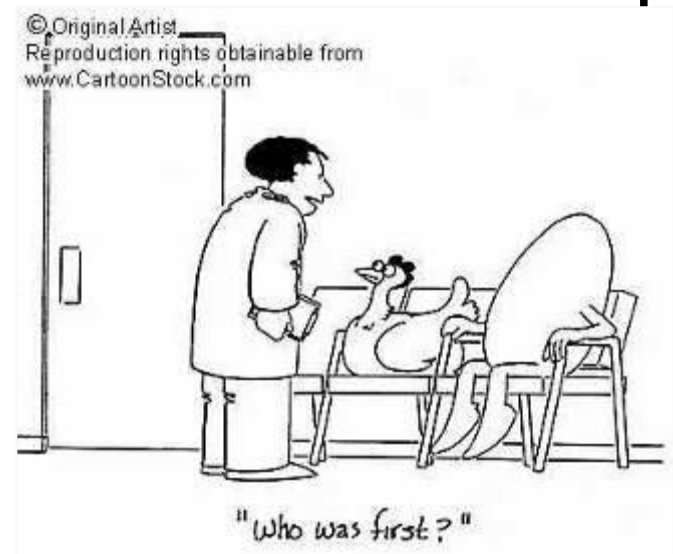
NH_3



HCl



Membrane ou code génétique d'abord ou en même temps?



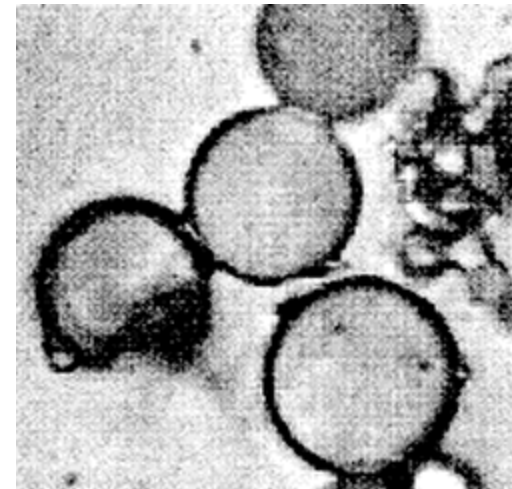
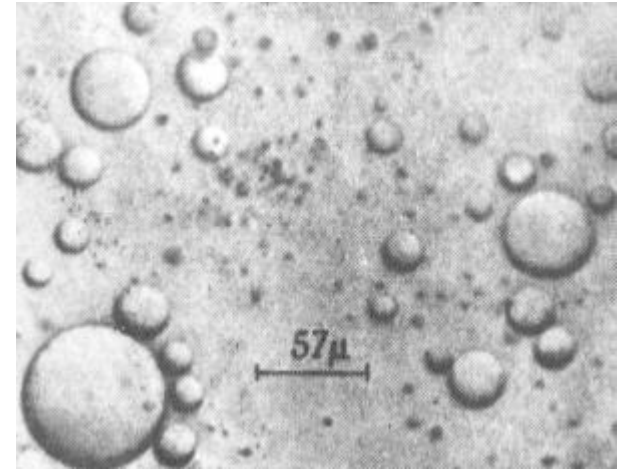
Origine de la membrane

Oparine 1924

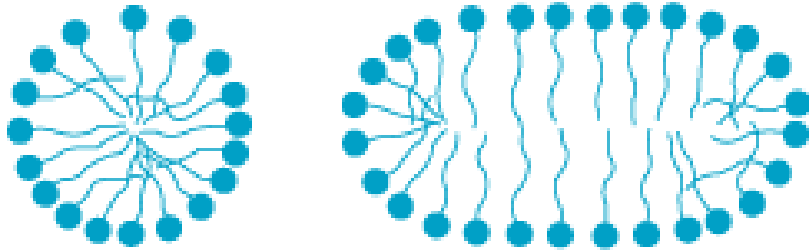
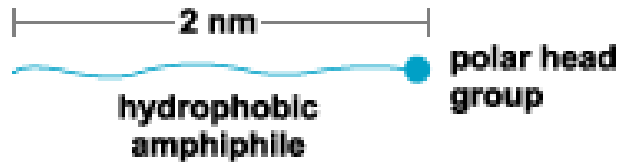
- Protéines (+ acides nucléiques + polysaccharides) + eau → coacervates

Sidney Fox 1958

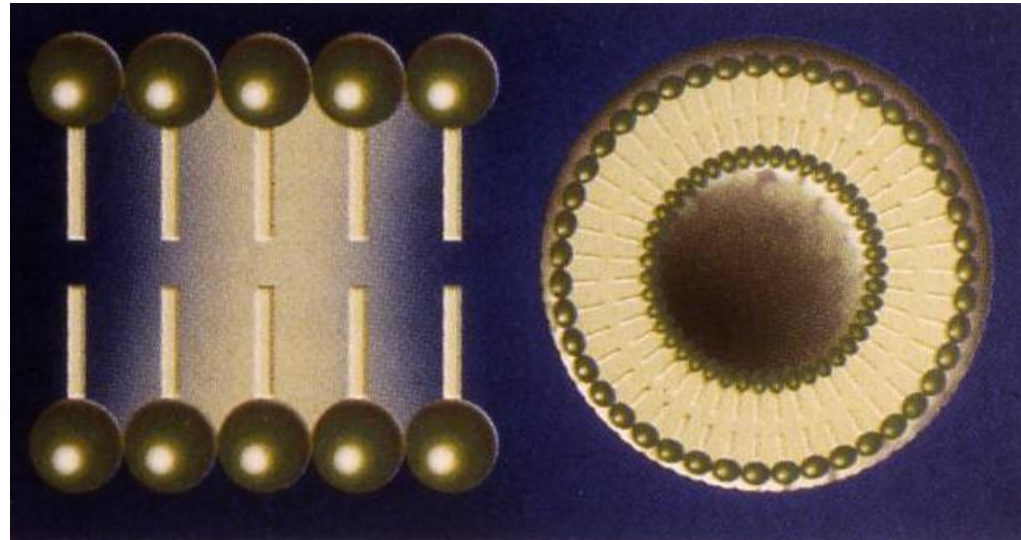
- Mélange sec d'aa à 180°C
3-5h → polymérisation
“protéinoïdes”
- + eau chaude →
Microsphères 2 μ à double
paroi, changement de volume
avec [sels]
- Temps → bourgeonnement et
séparation → 2nde génération



Auto-assemblage de molécules amphiphiles (lipides)

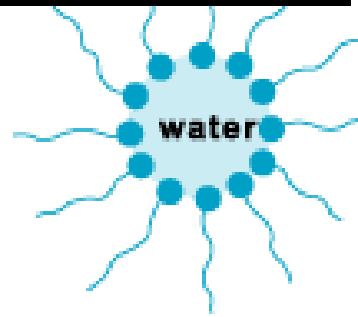
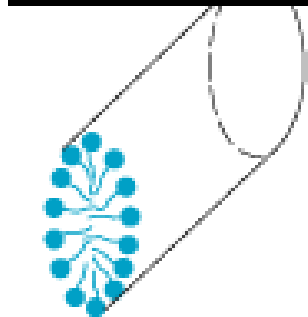


**Micelles et mono-couche
(lipides >6 C)**



**Double
couche**

**Vésicule
(Lipide à partir de 8 C)**



(c)

(d)

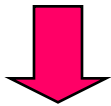
Lipides extraterrestres



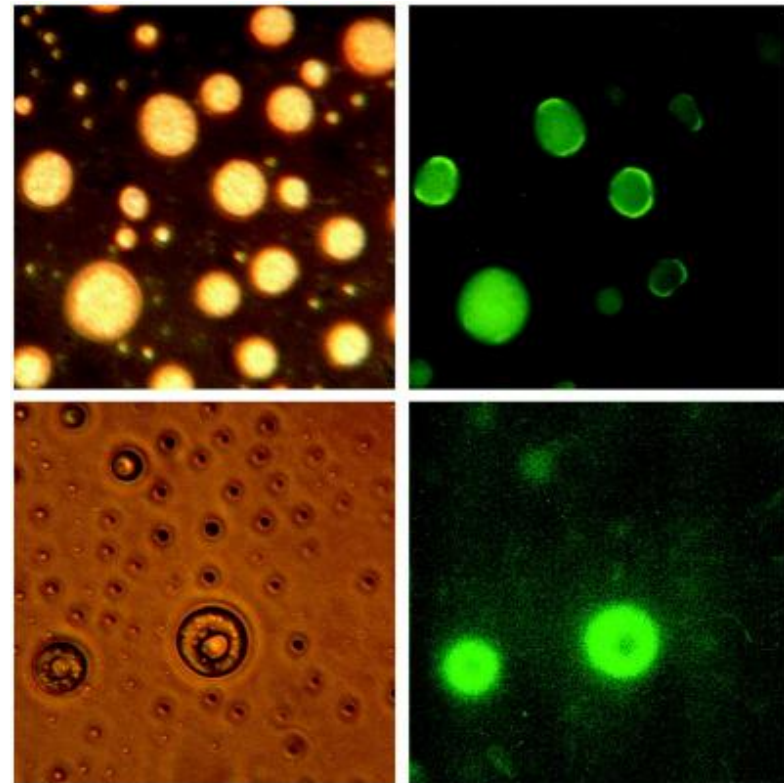
Résidus organiques
Réfractaires
(météorite Murchison)

+

H_2O



formation spontanée de
vésicules
à double paroi

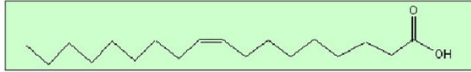


— 30 μm

Dworkin et al. PNAS, 2001

(Deamer, 1985)

Acide oléique



Synthesizing **life**

Jack W. Szostak, David P. Bartel & P. Luigi Luisi

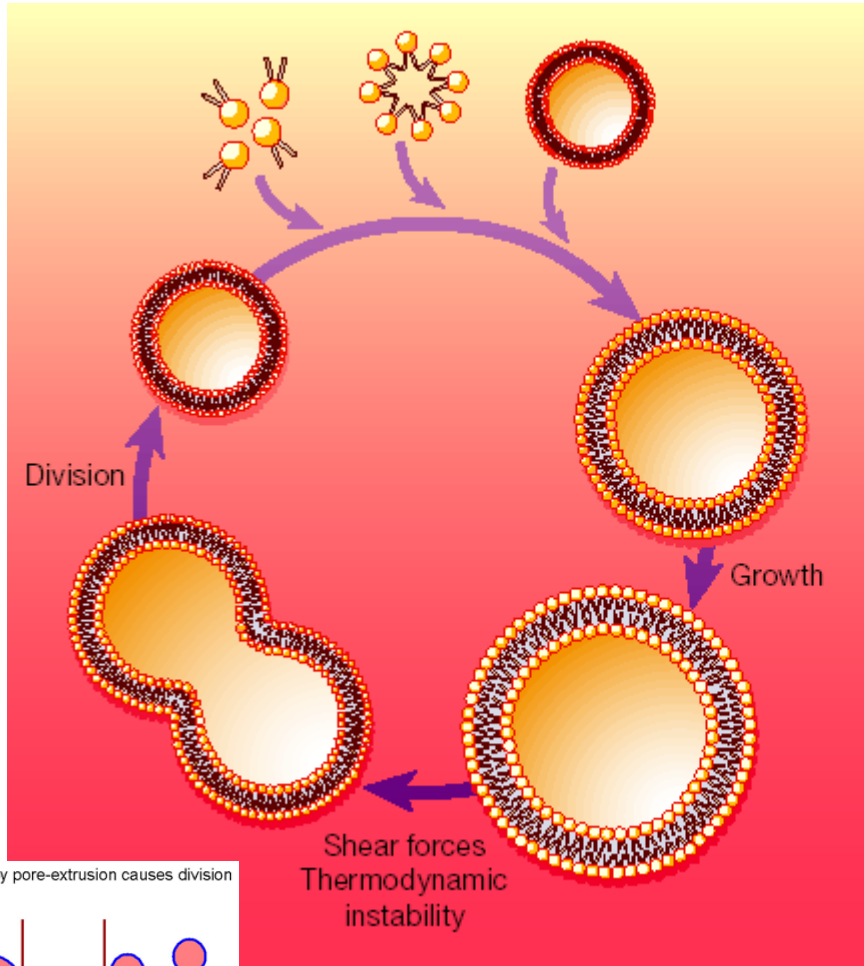
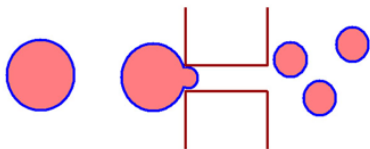


Figure 3 Modes of vesicle growth and division. Self-replicating membrane vesicles can grow either gradually or in discrete steps, and may divide either spontaneously or under the influence of external environmental forces.

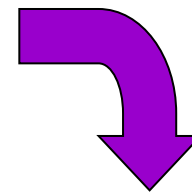
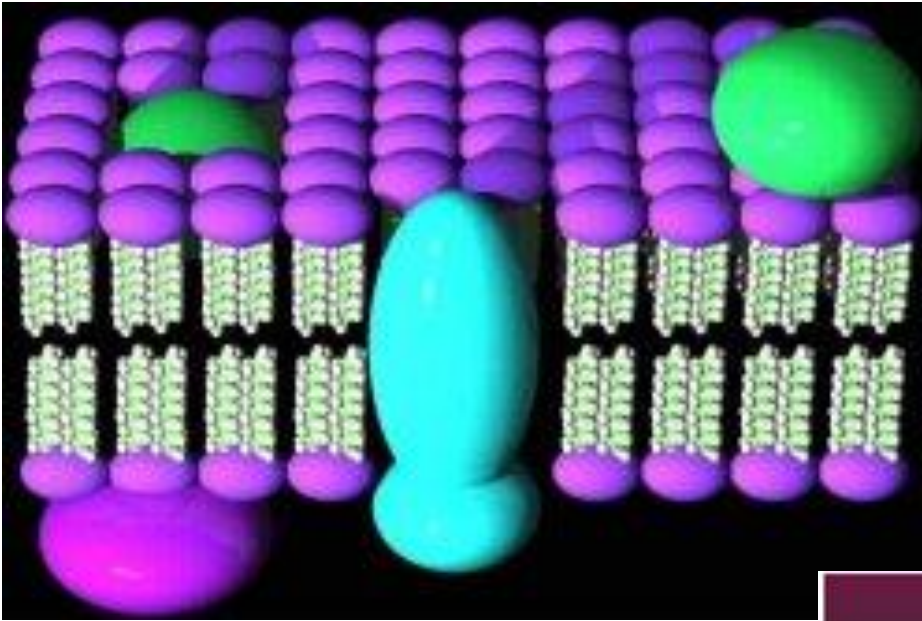
Input of mechanical energy by pore-extrusion causes division



Some contents are lost - but there is little if any dilution

(Nature, 2001)

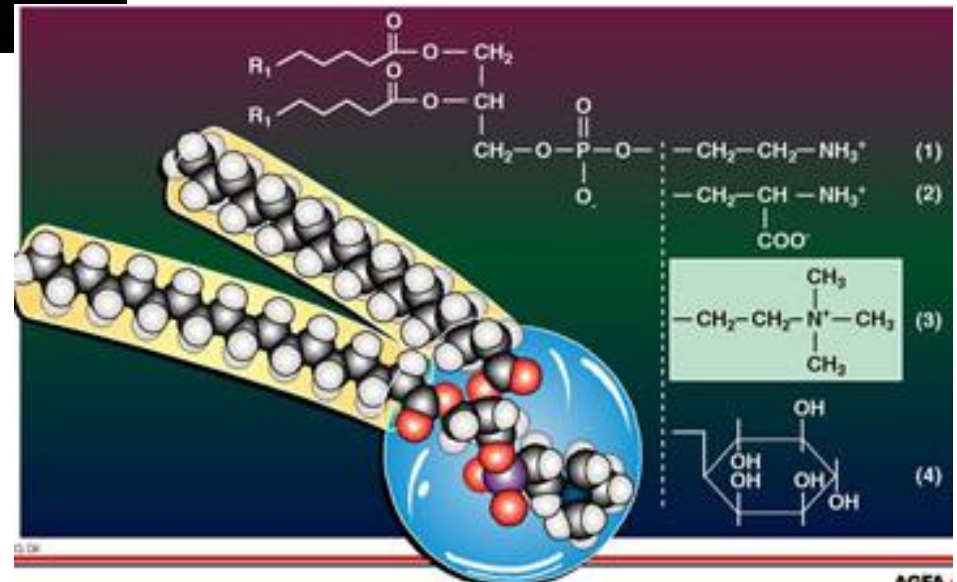
Membrane biologique



phospholipides

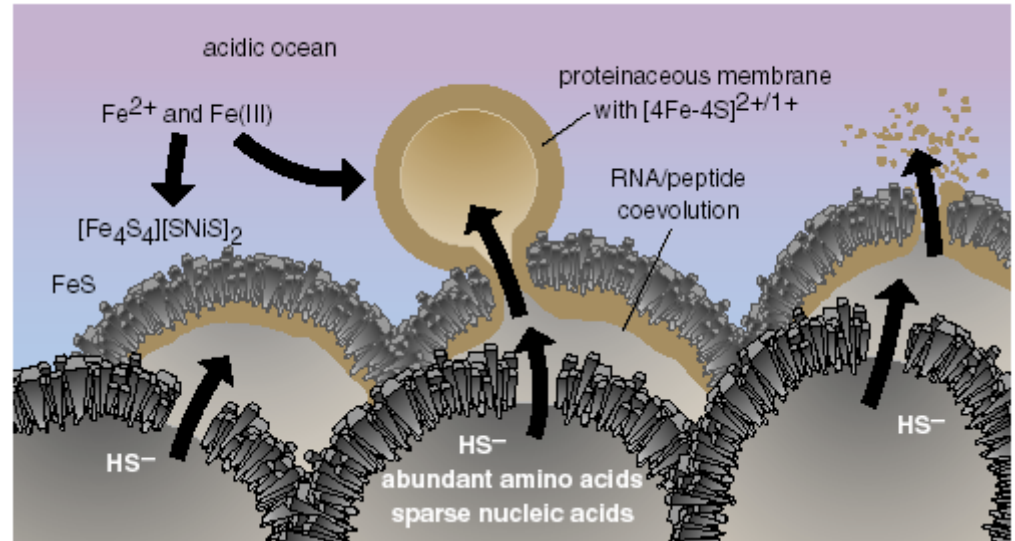
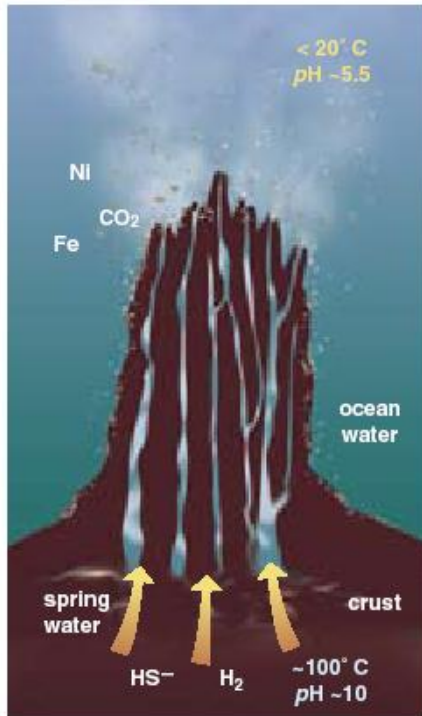
IMPERMEABLE

Mais perméabilité régulée par système de transport complexe (canaux et pompes de protéines intramembranaires)





Membrane minérale



(Martin W and M J Russell, 2003; Russell, Am Scientist, 2006)

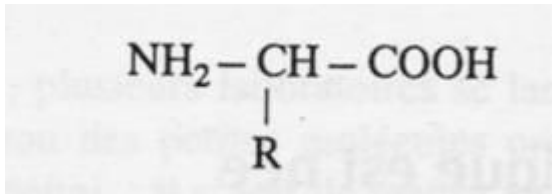
Origine du code génétique

Ingrédients

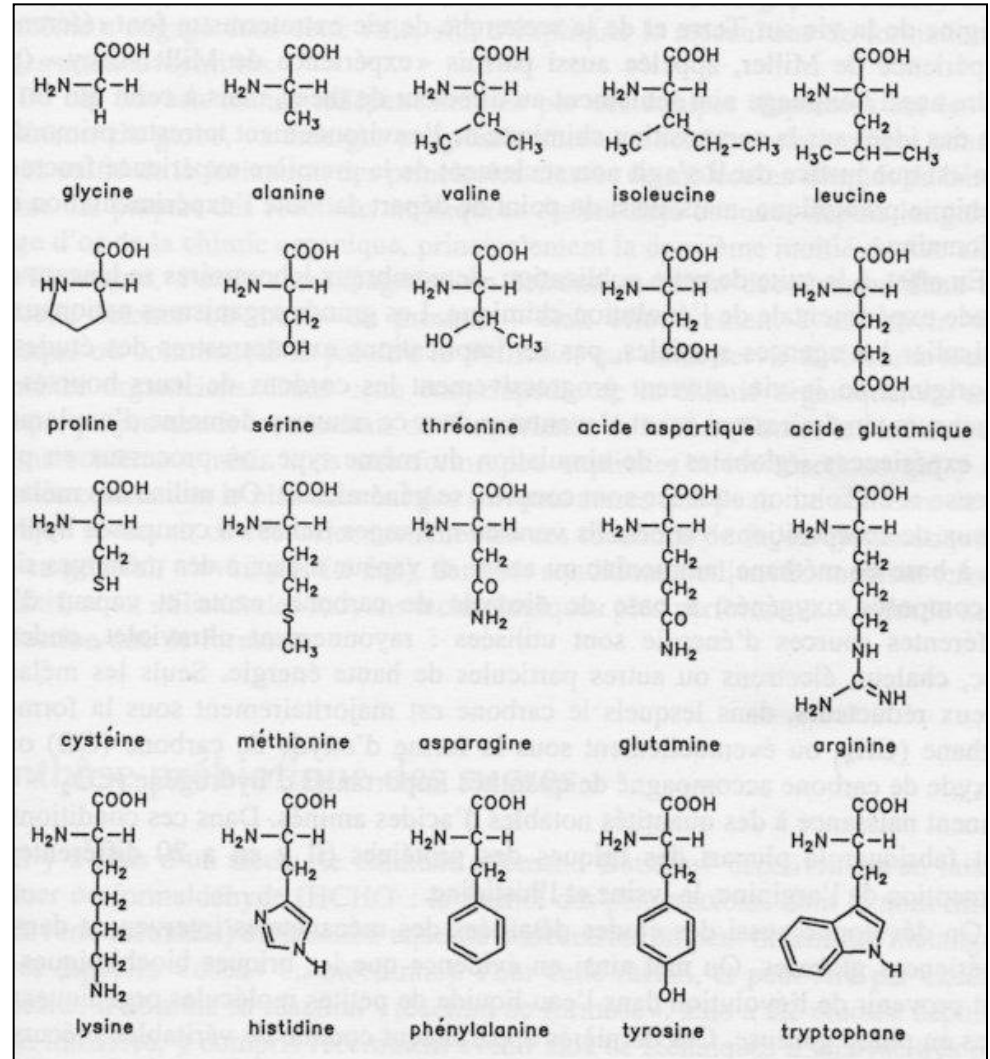
- acides nucléiques
 - Phosphate
 - Bases puriques et pyrimidiques
 - Sucre (Ribose si monde ARN)
- Acides aminés (protéines)
- ATP (énergie) = adénosine tri-phosphate

Acides aminés

- 20 Acides aminés: diverses sources possibles
- Homochiralité



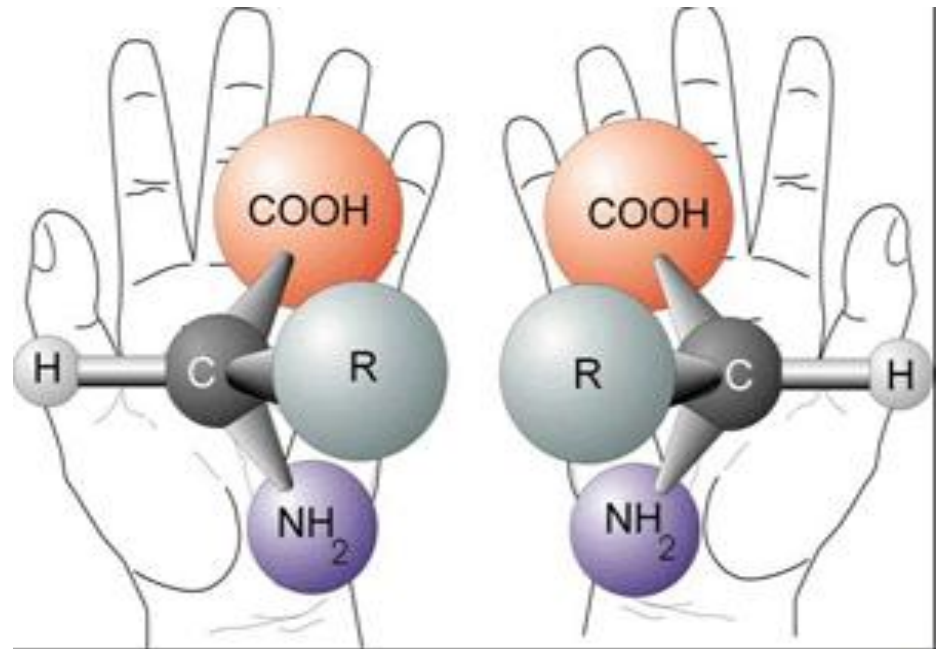
- Protéines =
Chaines d'acides aminés



Homochiralité et vie

- AA protéiniques homochiraux
- Sucres homochiraux (D-ribose, D-glucose, D-désoxyribose)
- Stéroïdes homochiraux
- Terpènes homochiraux
-

Vie et homochiralité sont liées



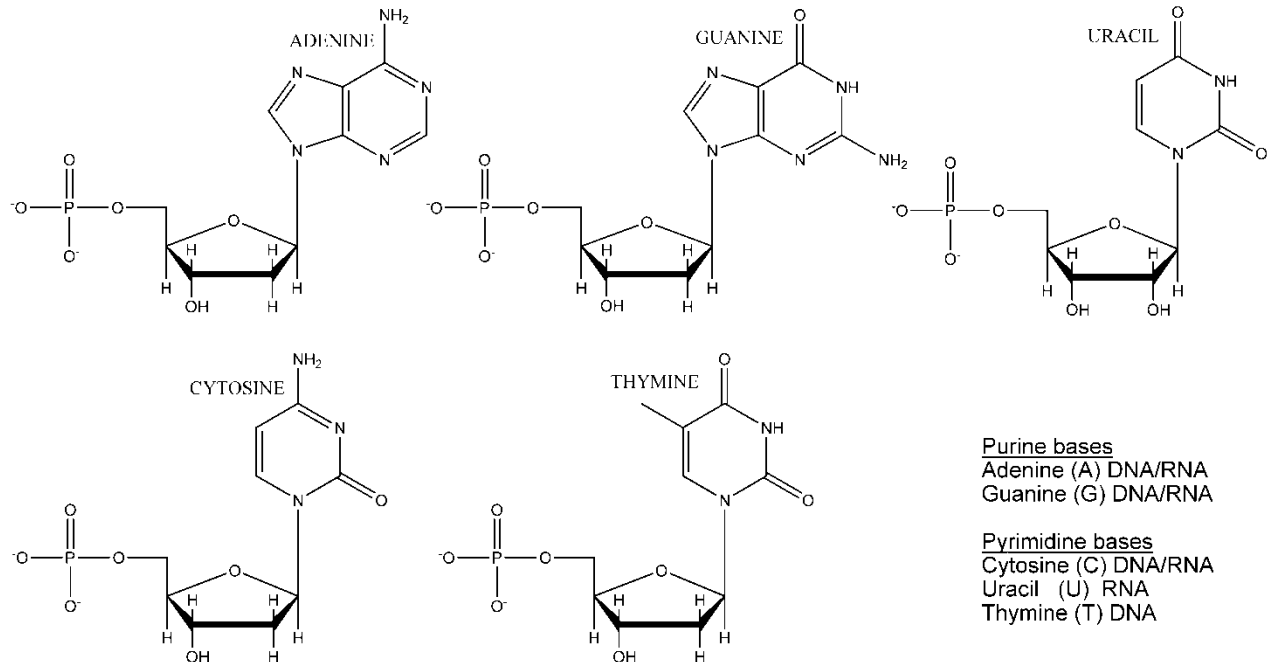
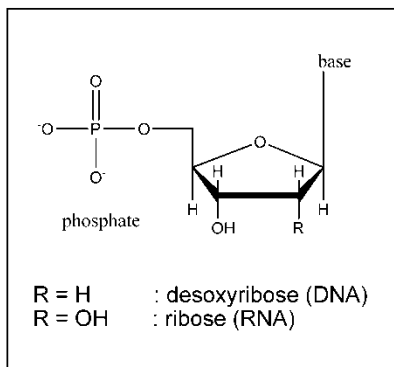
AA de Murchison et chiralité

Enantiomeric Excesses on Meteoritic Amino Acids
Cronin et Pizzarello, 1997 (Science, **275**, 951-955)

- AA non biologiques: ee de l'ordre de 10-15%
- Origine d'un tel ee?
- « Ensemencement » de la Terre primitive?

nucléotides

- L'ADN et l'ARN sont une chaîne de **nucléotides**, qui sont eux même constitués d'un **sucre**, un **phosphate**, et l'une des cinq **bases nucléiques** (bases puriques et pyrimidiques).

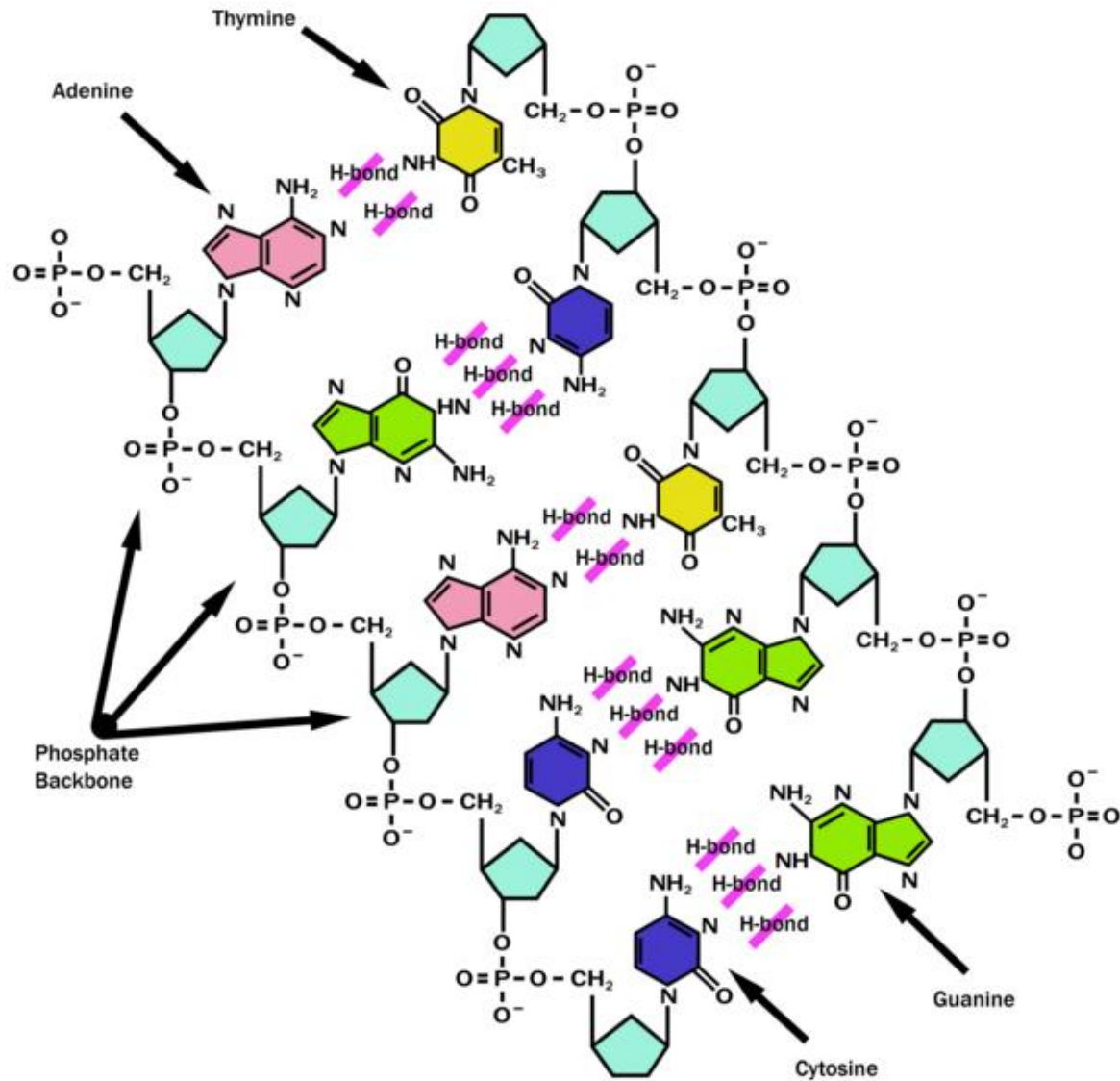


Purine bases
Adenine (A) DNA/RNA
Guanine (G) DNA/RNA

Pyrimidine bases
Cytosine (C) DNA/RNA
Uracil (U) RNA
Thymine (T) DNA

Acides nucléiques

- ADN



Simuler un fumeur noir...

Table 1. Experimental conditions

Temperature 150 °C; pressure 10 atm.;
Volume (aq.) 700 ml; volume (tot.) 1 000 ml

Gas phase (Experiments A and B):
CO₂ and H₂ (3:1 mixture)

Aqueous phase (Experiments A and B):
KCN (0.19 M); NH₄Cl (0.23 M);
HCHO (0.18 M, with 10–15 %
methanol)

HCl (conc., approx. 0.08 M)
in Experiment A only:
NaHS (0.05 M)

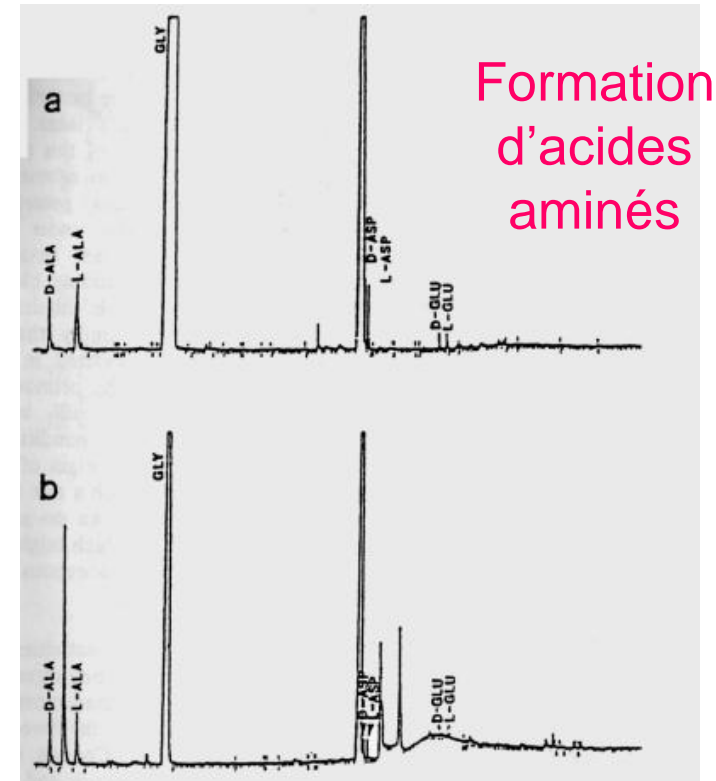
Mineral phase:

Experiment A: pyrite + pyrrhotite
+ magnetite (1:1:1, 10 g, coarse
powder)

Experiment B: illite (10 g, number
35 Illinois)

in Experiments A and B: platinum
powder (approx. 0.1 mg, fine
powder)

TiO₂ (autoclave liner material)

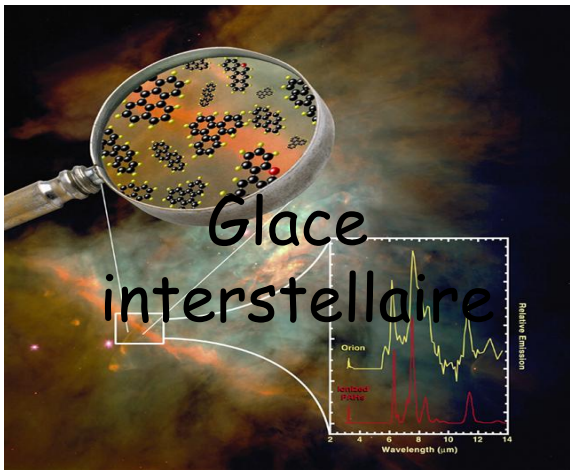


Hennet et al., 1992

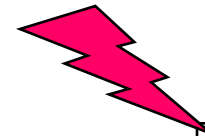
See also Yanagawa & Kobayashi, 1992

Simuler

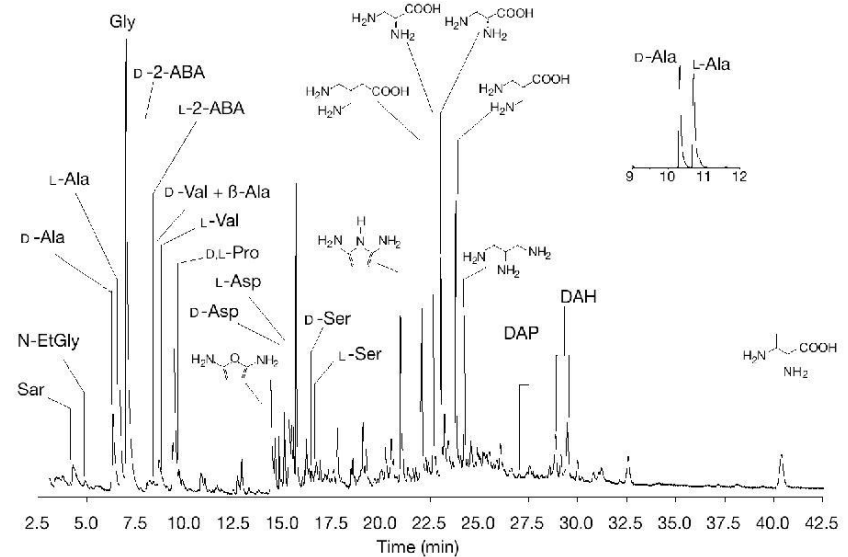
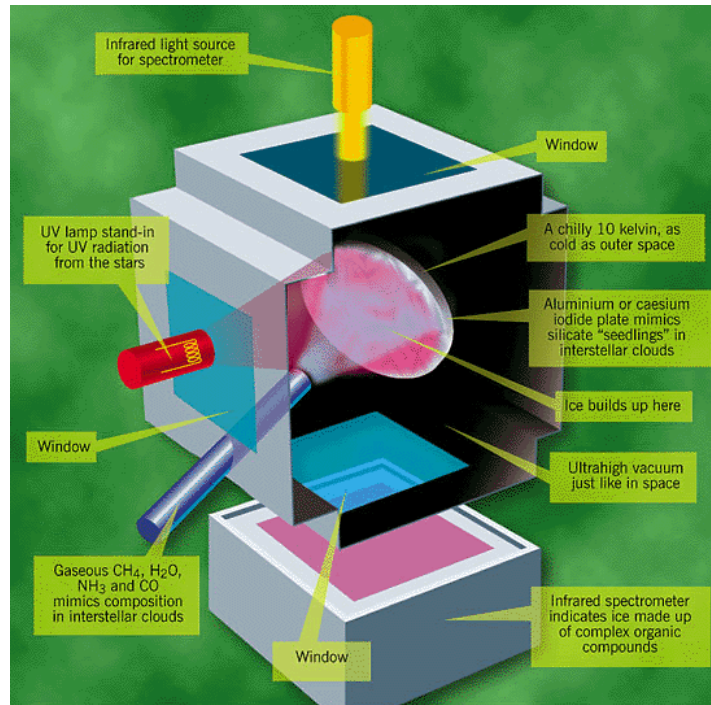
l'espace...



radiation UV
(étoile ou labo)
-253° C

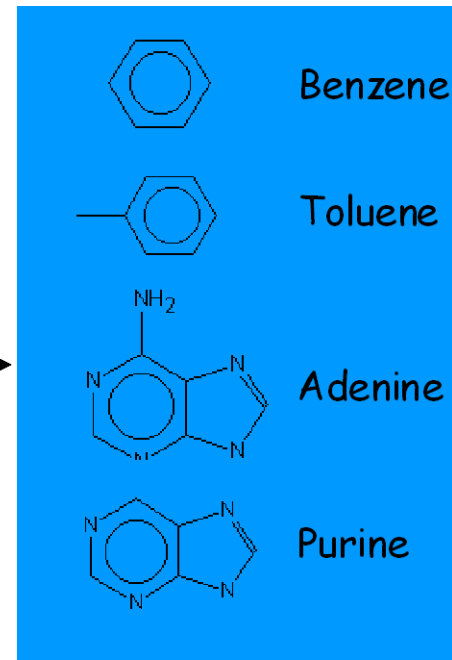
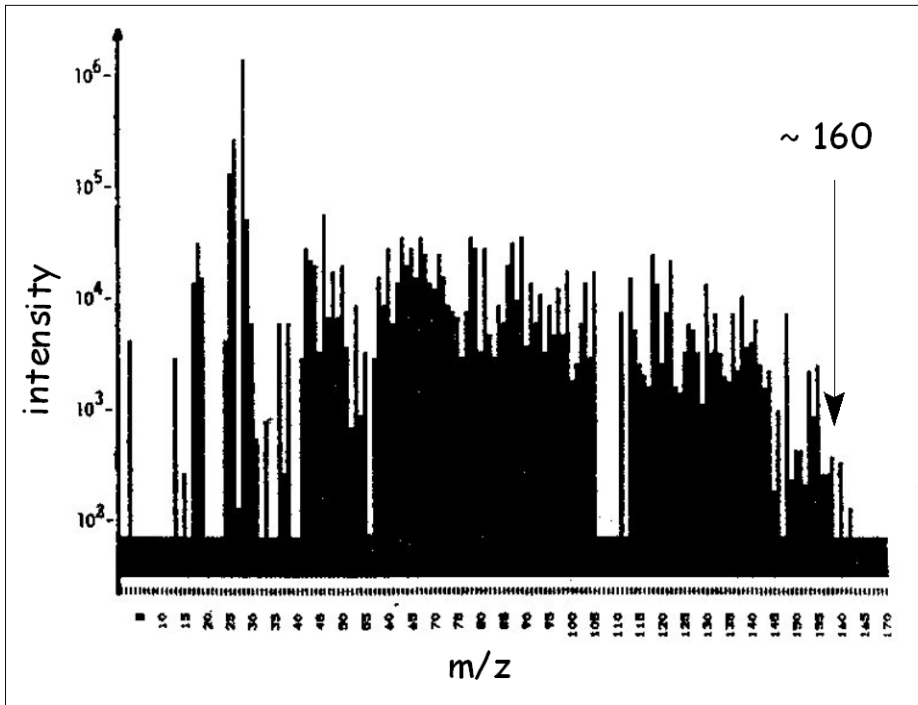


Molécules prébiotiques



Munoz Caro et al.,
Nature, 416, 2002

Analyse de comètes



+ about 30 other compounds
Cumulated mass spectra collected in comet Halley by instrument PUMA on board VEGA-1 spacecraft and tentative interpretation. (from Kissel & Krueger, 1987)

Analyse de météorites

Macrométéorites



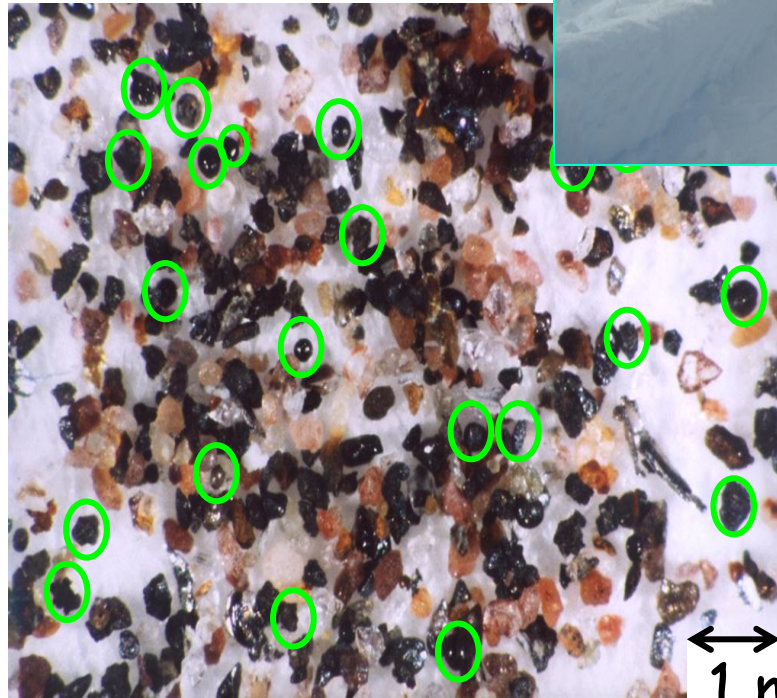
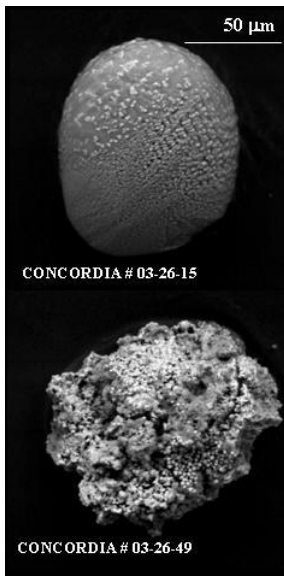
>70 aa

Micrometeorites :
~ 10 000 t/an

Concordia
Détection d'acides aminés

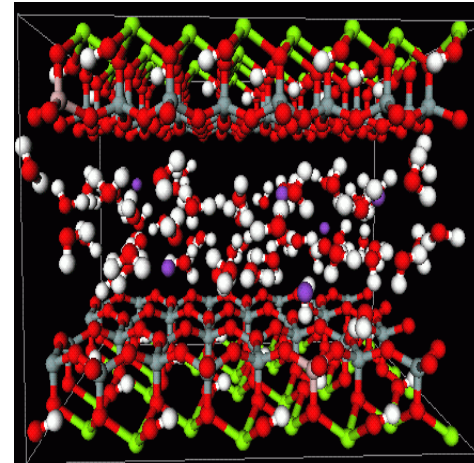
Dome C Antarctique

Collectes côtières : sable glaciaire avec jusqu'à 20% de micrométéorites...

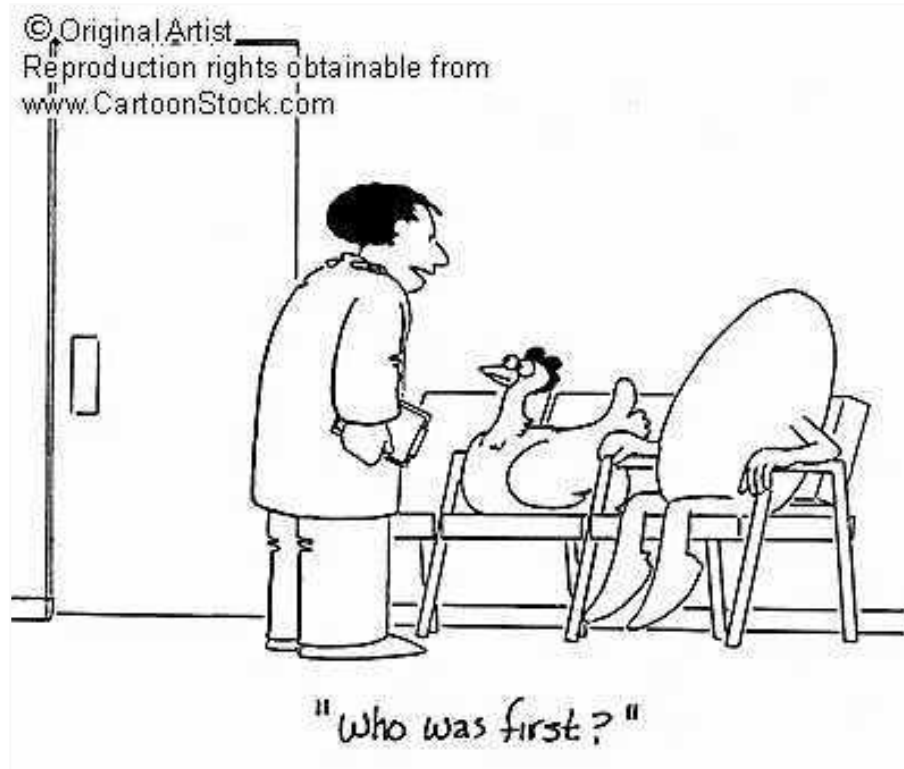


Origine du code génétique

- Concentration et polymérisation de petites briques en longues molécules:
 - À la surface et dans les minéraux argileux, micas, pyrite (minéraux= support, sélectivité, catalyseur)
(Graham Cairns-Smith 1960 ; James P. Ferris et L. Orgel; Hansma, 2007)
 - Dans glace (gel)
 - Par évaporation dans lagons ou “tide pools”
 - Dans membrane lipidique ou protéinique



paradoxe



- Actuellement l'ARN est synthétisé grâce aux protéines et les protéines sont synthétisées grâce à l'ARN!

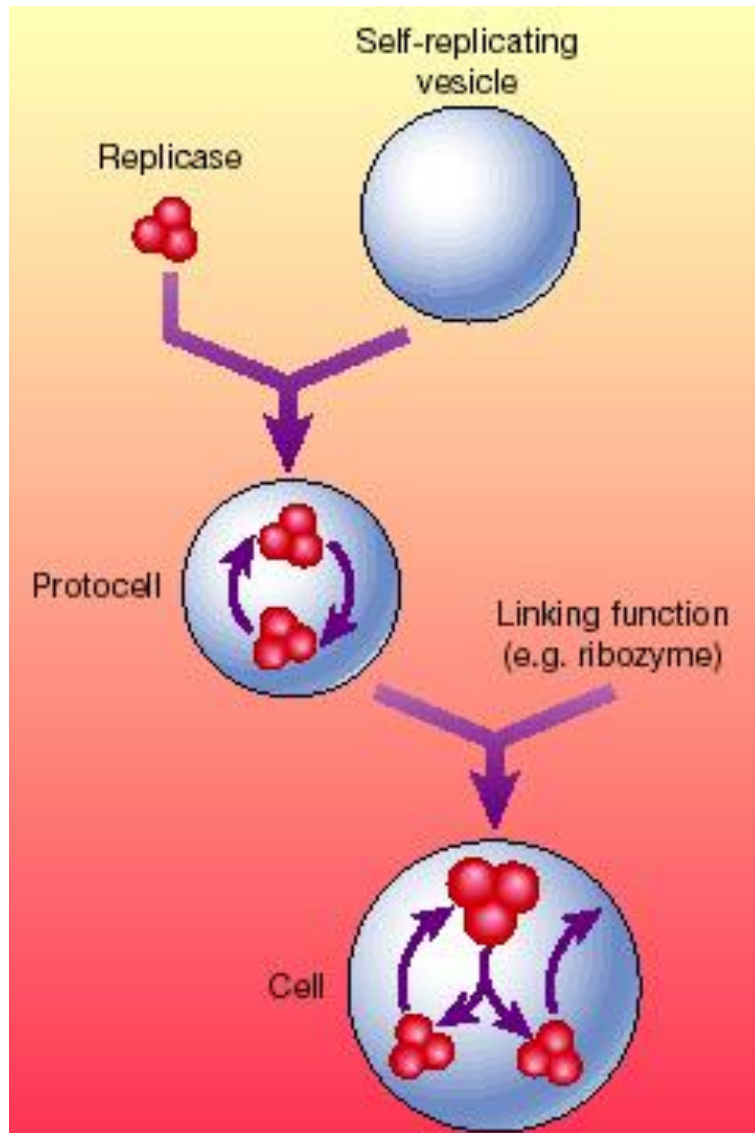
Origine du code génétique



- **ARN d'abord** 1960s Carl R. Woese, Francis Crick, et L Orgel proposent l'hypothèse du "RNA world" (L'expression "RNA world" vient de W. Gilbert 1986)
 - 1989 prix Nobel Cech & Altman découvrent les ribozymes: ARN catalyse des réactions comme les enzymes
- **Protéines d'abord** Sidney Fox 1958
- **ARN et protéines en même temps**
 - sur l'argile Graham Cairns-Smith (*"Seven clues to the origin of life"* en 1985) ou
 - sur la pyrite Martin W and M J Russell, 2003
- **Thioesters d'abord** Christian de Duve (prix Nobel de médecine) dans un milieu chaud, acide et riche en H₂S (fumeurs)
- **Petites molécules d'abord** Robert Shapiro 2006
 - monde ARN peu probable car trop complexe et Ribose difficile à faire, instable
 - Pre-RNA world PNA (peptide nucleic acid), TNA (threofuranose nucleic acid) (mais problème de sites réactifs)

Synthesizing life

Jack W. Szostak, David P. Bartel & P. Luigi Luisi

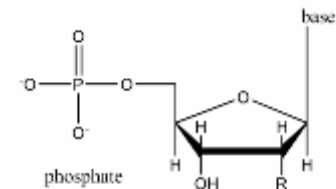
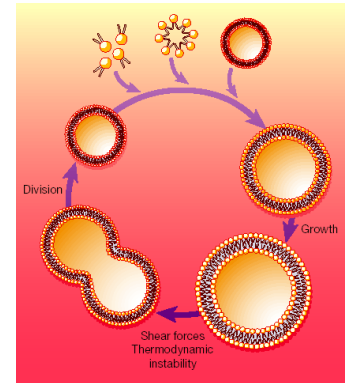


- Deux composants auto-réplicateurs:
 - ARN réplicase (grâce à sa séquence de nucléotides) et
 - vésicule (grâce aux interactions entre lipides)
 - Les molécules d'ARN sont encapsulées spontanément dans les vésicules
- Assemblage de protocellule

(Szostak et al, Nature, 2001)

Nous comprenons maintenant:

- L'origine des **briques de la vie**
 - sucres, acides aminés, bases, simple lipides dans les météorites, comètes, ou se forment par expériences de Stanley Miller ou dans les sources hydrothermales
 - Phosphate des minéraux, chondrites, poussières volcaniques ou sources hydrothermales
- L'origine de l'**eau**
- L' auto-organisation des **membranes**
- L' auto-organisation des **oligopeptides**
- La formation de **nucléotides**

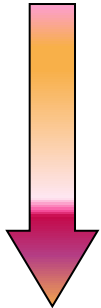


R = H : desoxyribose (DNA)
R = OH : ribose (RNA)

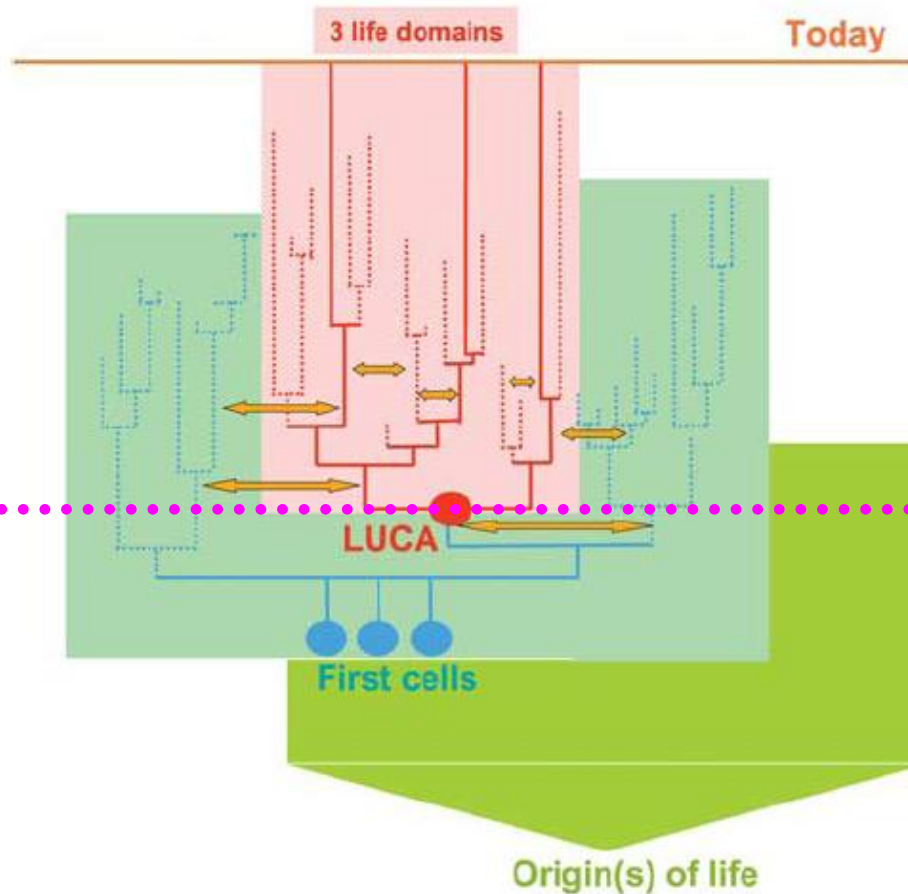
Ce que nous ne comprenons pas encore

- La formation spontanée de **polynucléotides**
- La concentration **en un endroit, simultanément**, des briques nécessaires pour former les premières cellules
- La formation spontanée d'un **code**:
molécules porteuses d'information
(pas juste un alphabet!)

Top-down



?



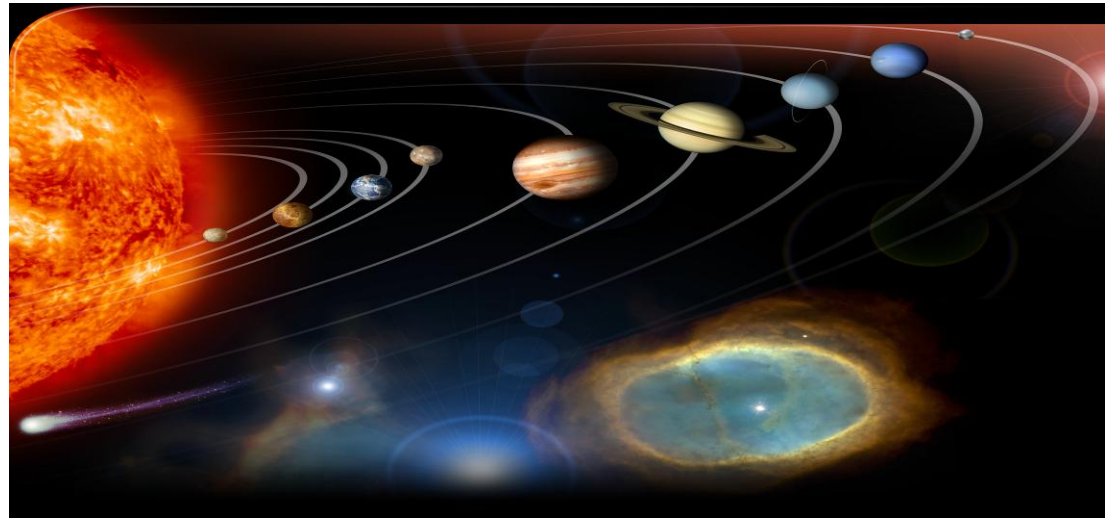
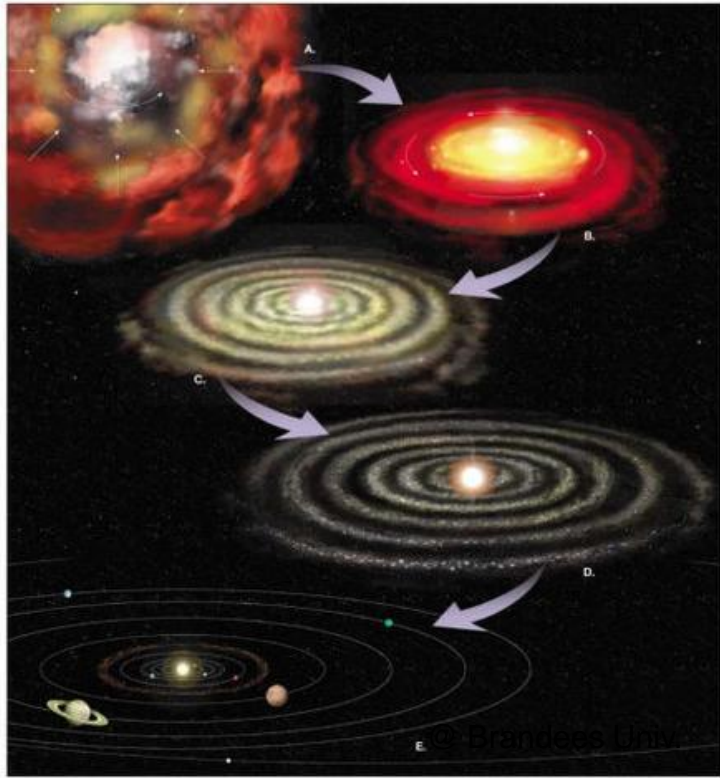
✓ *briques*

Bottom-up

Quand?

4,567 milliards d'années

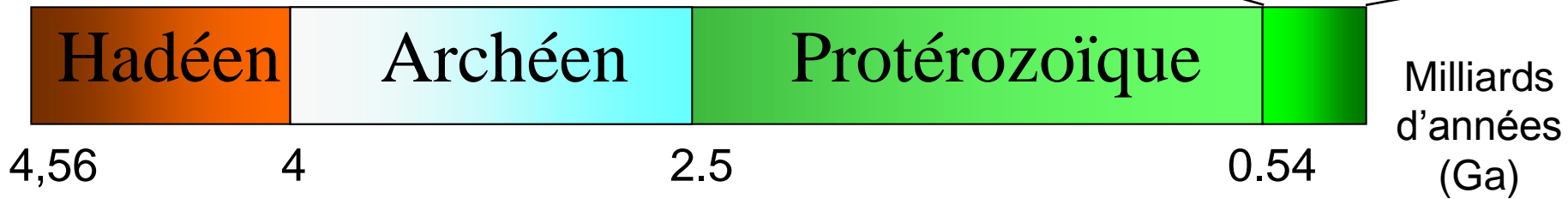
Naissance du système solaire



Échelle des temps géologiques

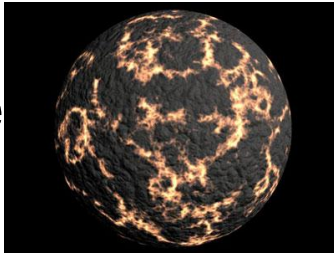
PRECAMBRIEN

Phanérozoïque



Quand la vie a-t-elle pu apparaître?

Accrétion
de la Terre



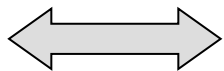
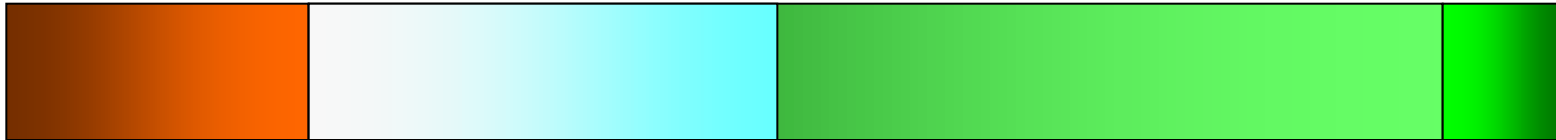
4,56

4

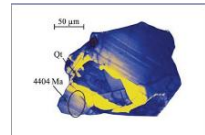
2.5

0.54

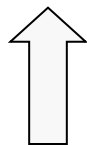
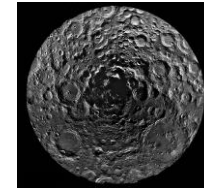
Milliards
D'années



4.4-4 Ga Atmosphère, lithosphère, océans



4-3.9 Ga Bombardement intense
de météorites (LHB)



3.85 Ga Roches sédimentaires



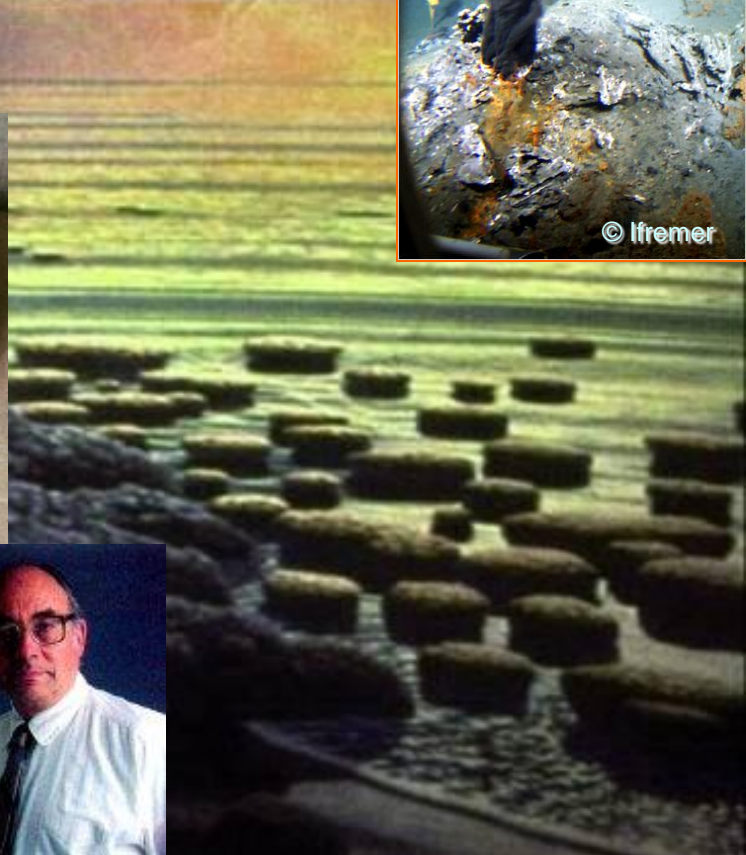
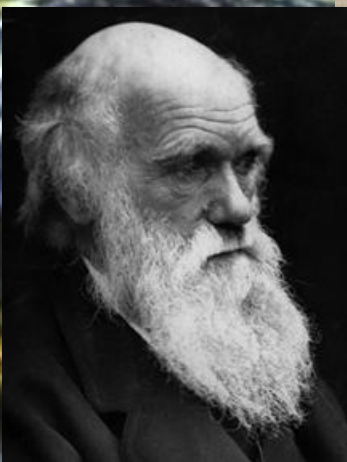
?

?

Vie



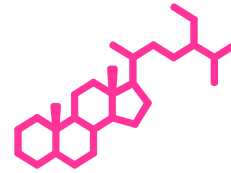
Entre 4 et ~3.5 milliards d'années
la vie apparaît



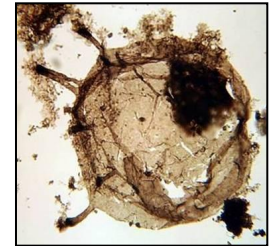
Comment reconstruire l'histoire de la vie?

- Géologie-Biologie
 - Environnement
 - Traces de vie

→ Les quatre premiers milliards d'années



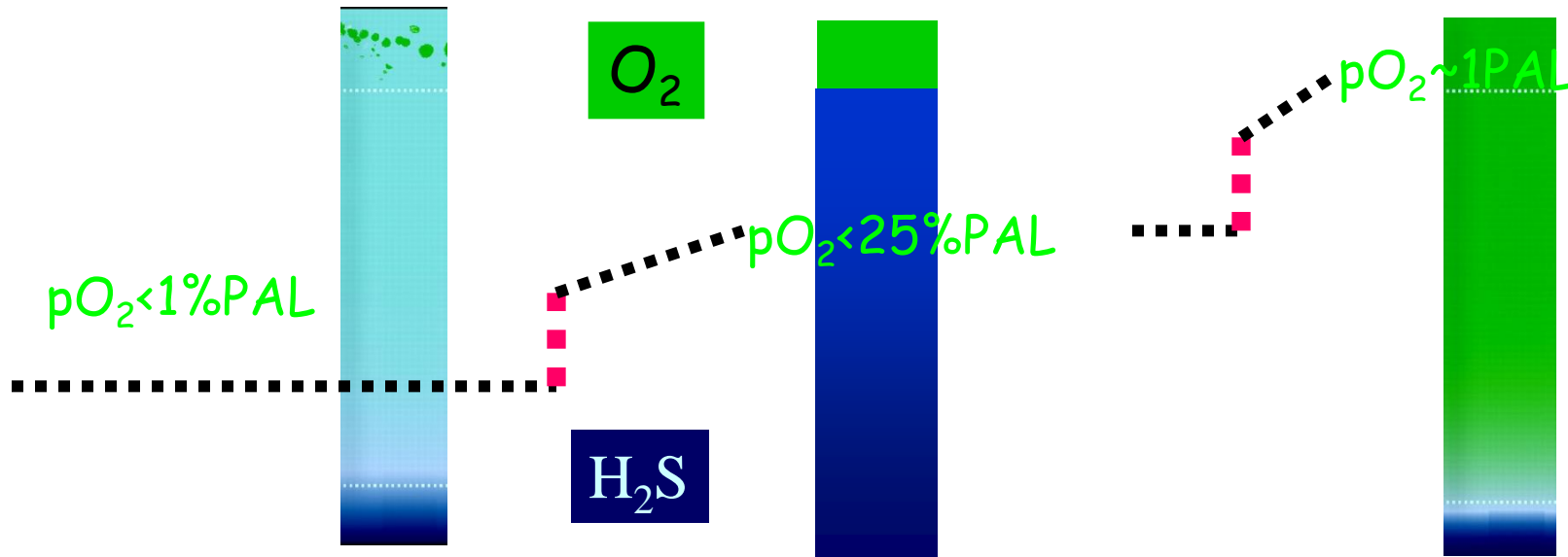
$\delta^{13}\text{C}$



$\delta^{34}\text{S}$



@Friedman

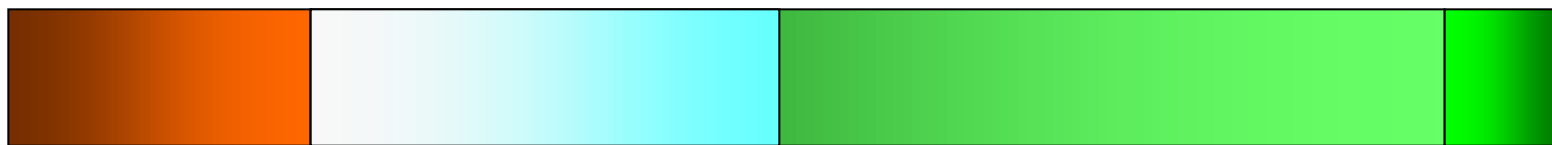
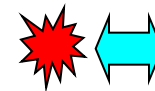
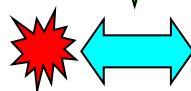
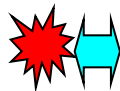


Il y a 600 Ma
(Fin Précambrien)

Tectonique des plaques



O_2



4,56

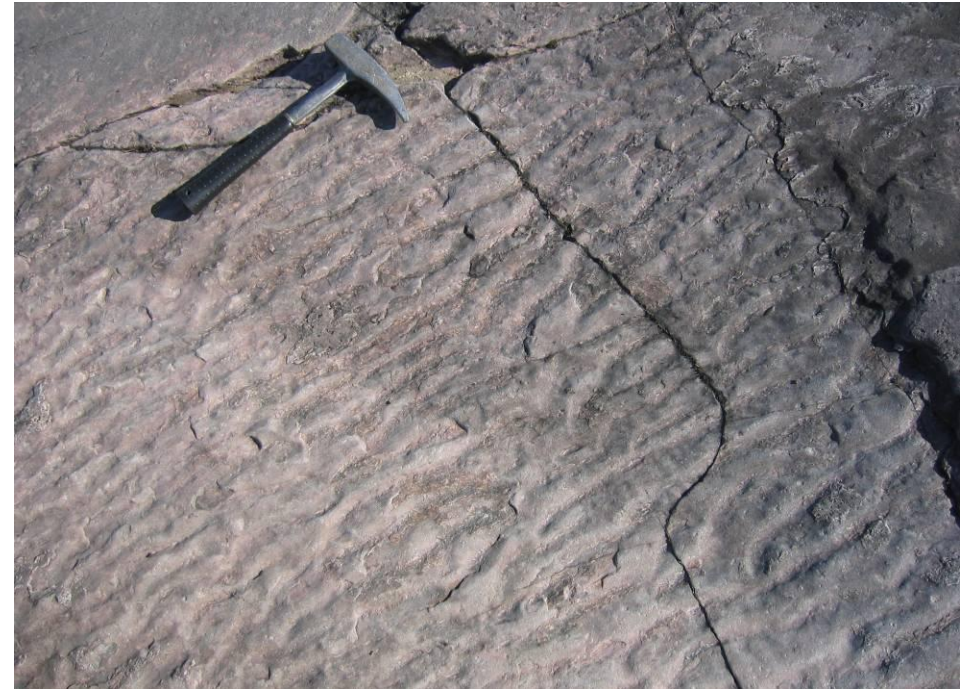
4

2.5

0.54

Milliards
D'années

Le présent est (souvent) la clef du passé



2 Ga, Karélie, Russie

~1.9 Ga Ludikovien, Karélie, Russie

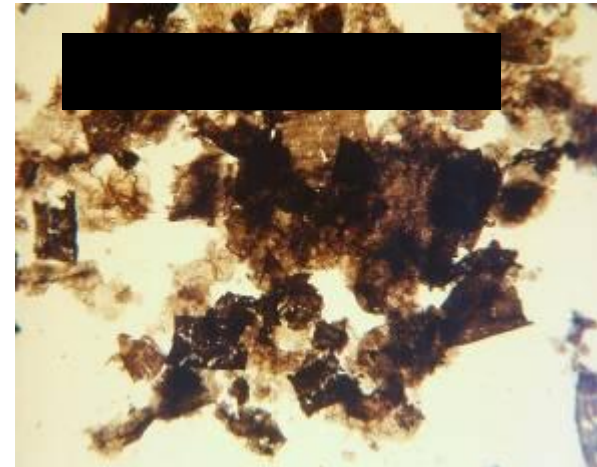




Sondages



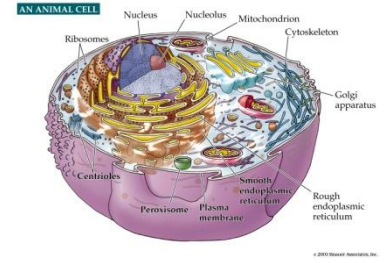
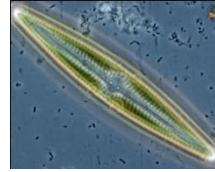
Géochimie
C1=CC=C2C(=C1)C(=C3C=C2)C=C3 $\delta^{13}\text{C}$



Microscopie, microchimie

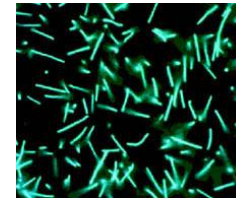


La vie

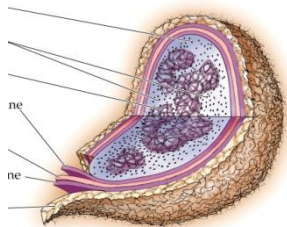
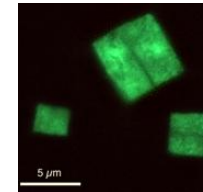
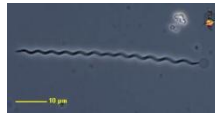


EUCARYOTES

BACTÉRIES



ARCHÉES



© 2003 Sinauer Associates, Inc.

Ancêtre commun

(modifié d'après Lopez-Garcia)

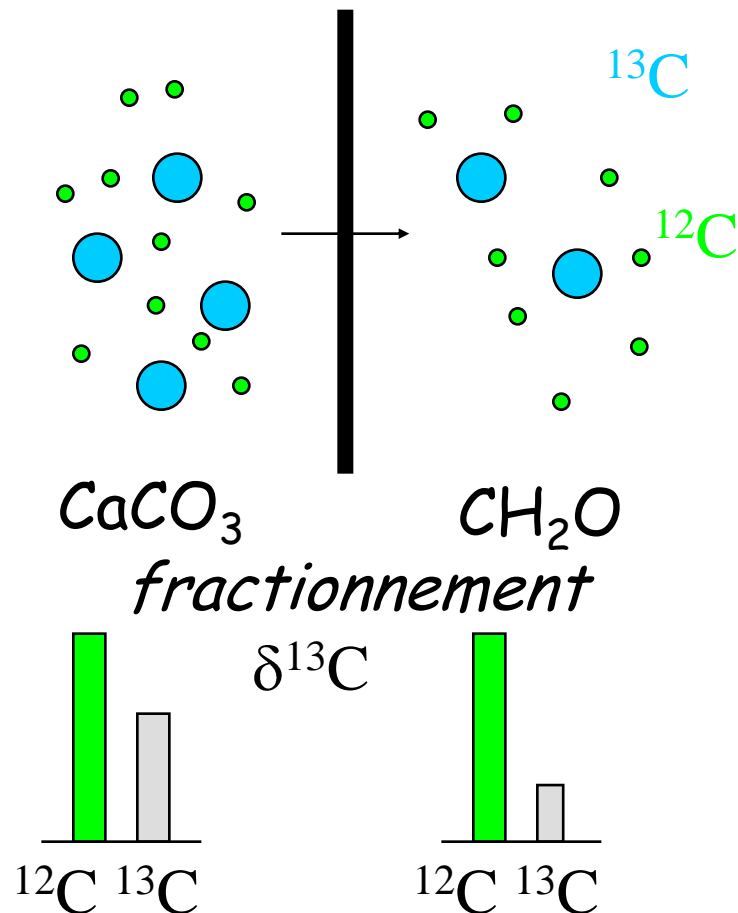
Quelles traces de vie dans le Précambrien?

- Isotopes de C, S, N, Fe
- Biomarqueurs
- Structures biosédimentaires
- Fossiles

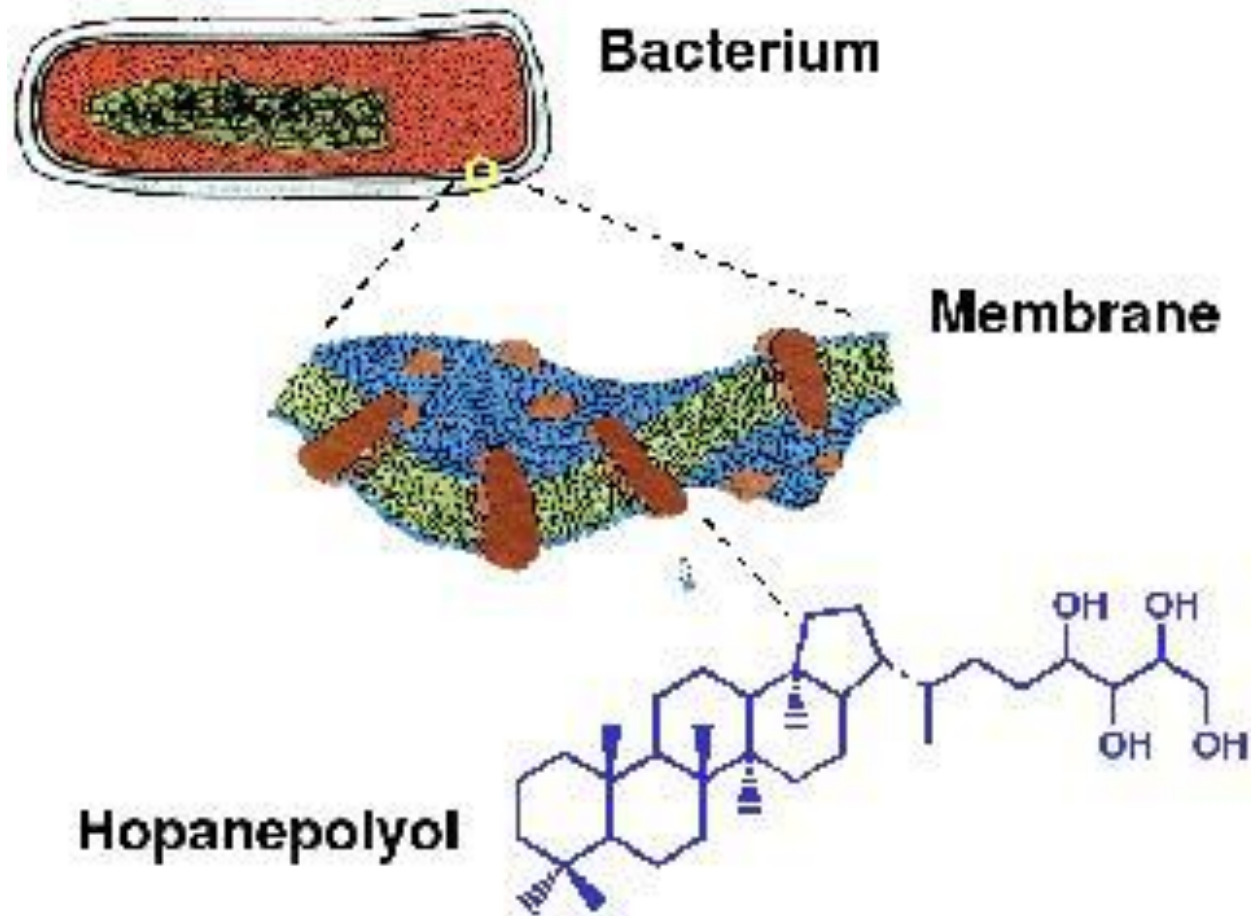


Traces isotopiques de la vie

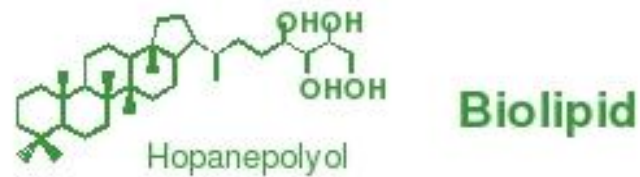
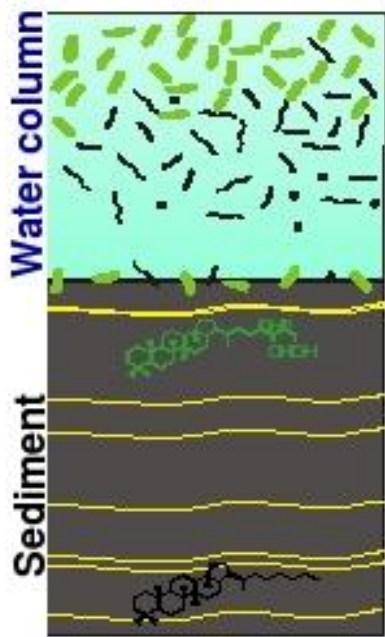
• ^{12}C (99%) (6 p+, 6n°), ^{13}C (7n°), ^{14}C (8n°)



Biomarqueurs: molécules fossiles



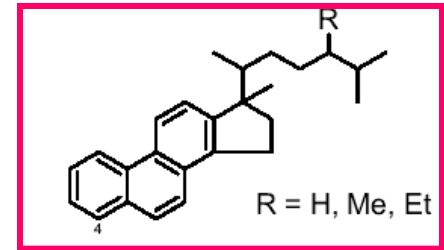
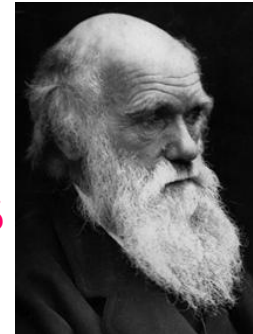
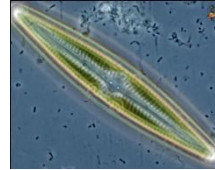
Biomarqueurs: molécules fossiles



Diagenesis



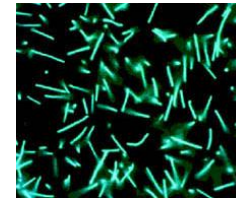
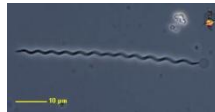
La diversité du vivant



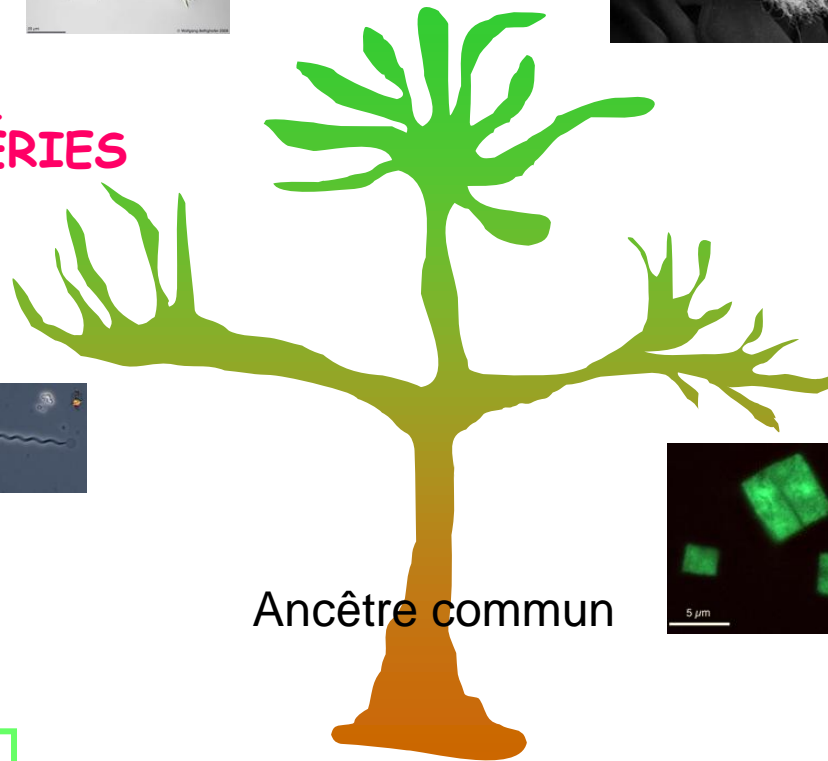
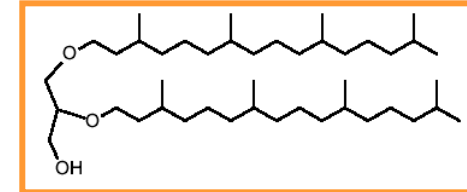
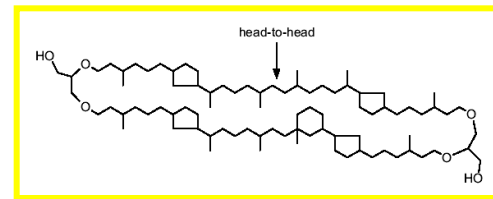
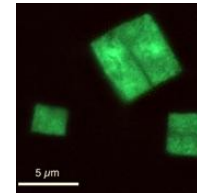
EUCARYOTES



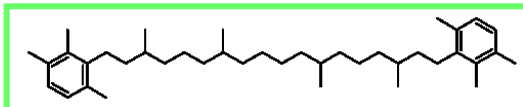
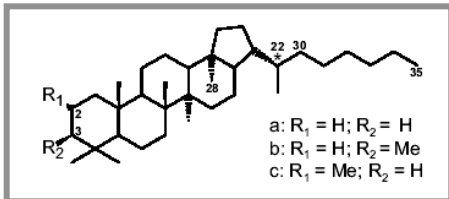
BACTÉRIES



ARCHÉES



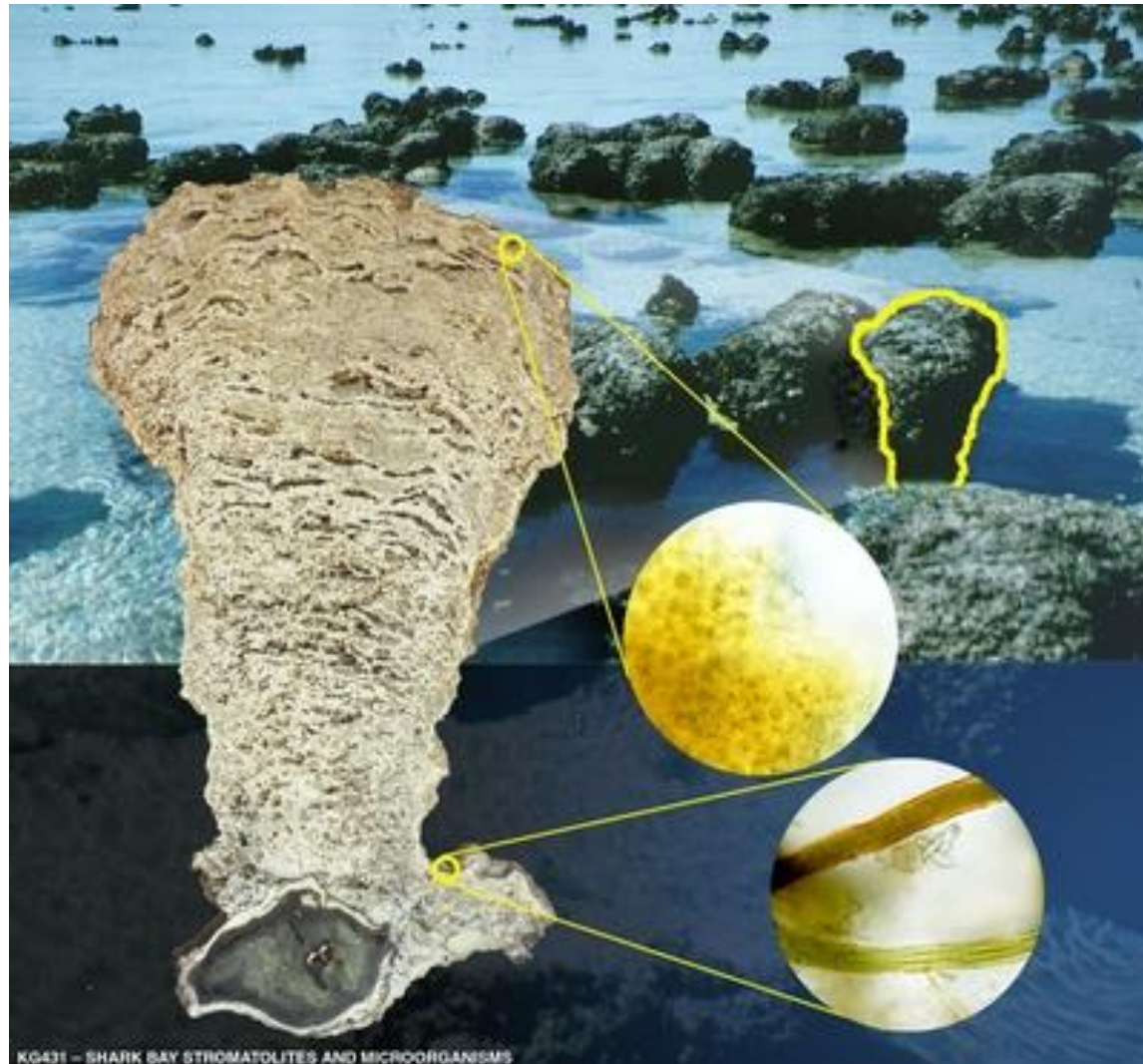
Ancêtre commun



Structures biosédimentaires

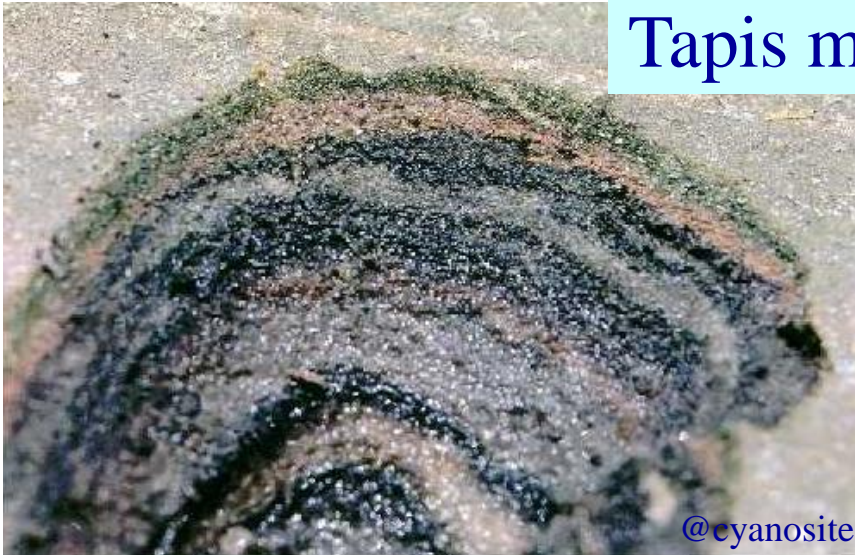


Structures biosédimentaires



Structures biosédimentaires

Tapis microbiens



@cyanosite



@Javaux

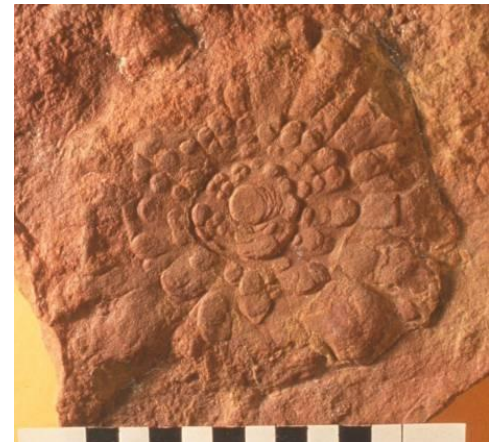
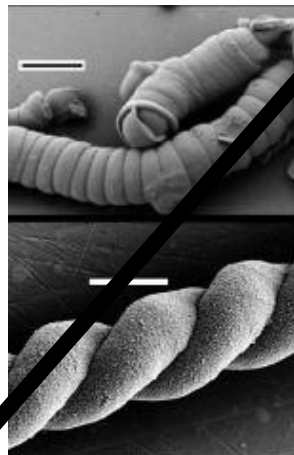
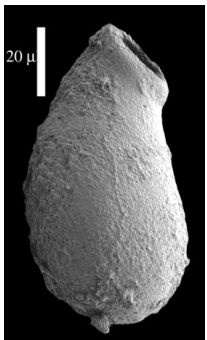
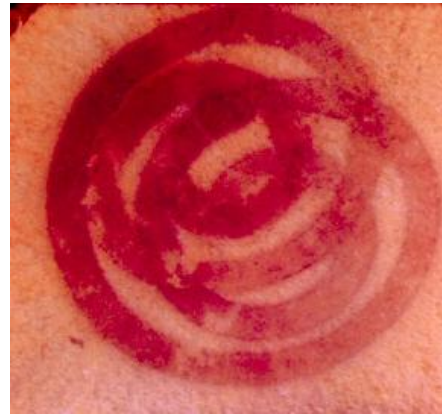
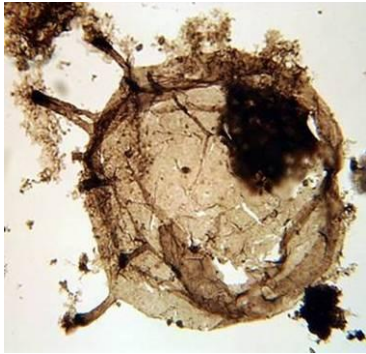


@Rothschild



@Javaux

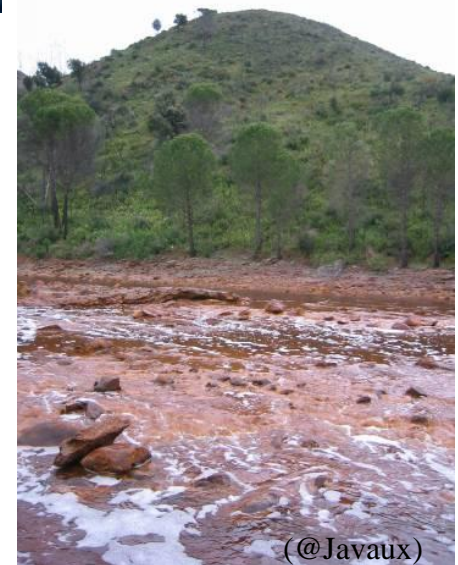
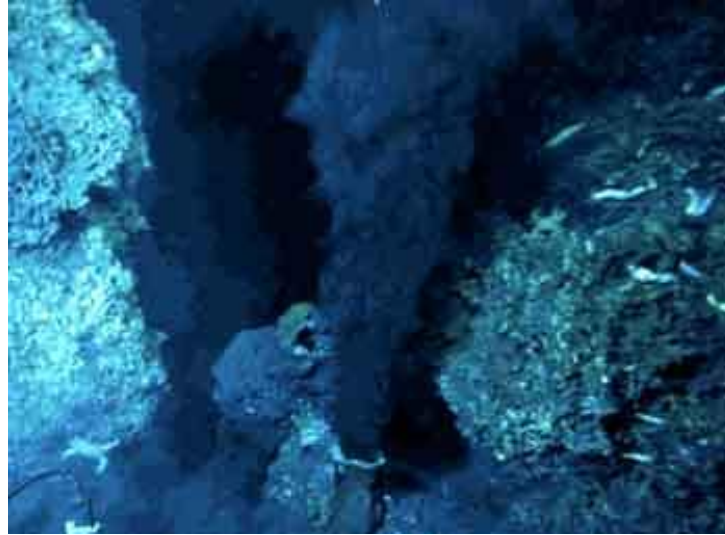
Fossiles: micro et macro



(Garcia-Ruiz et al, 2003)

(@Knoll, Butterfield, Porter, Javaux)

De la vie partout! Quelles traces de vie?



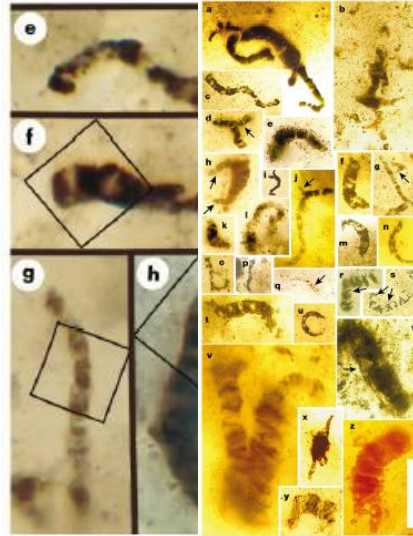
Des débuts controversés...

3.87 Ga, Isua, Akilia
Groenland



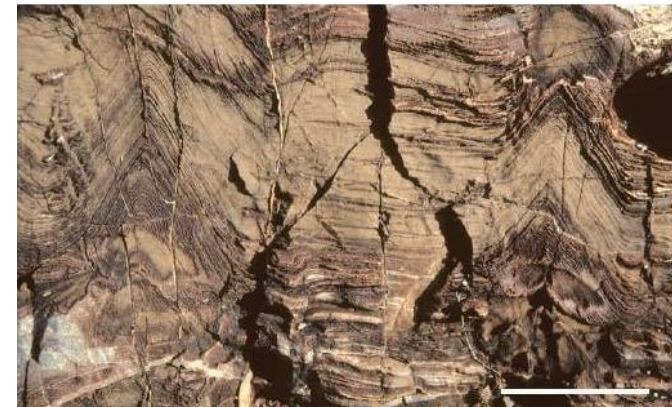
(Mojzsis et al., 1996; Rosing et al., 1999; Van Zuilen et al., 2002)

3,465 Ga Apex
Chert, Australie



Schopf et al., 2002;
>> Brasier et al., 2002

3,43 Ga Streeley Pool Chert,
Australie

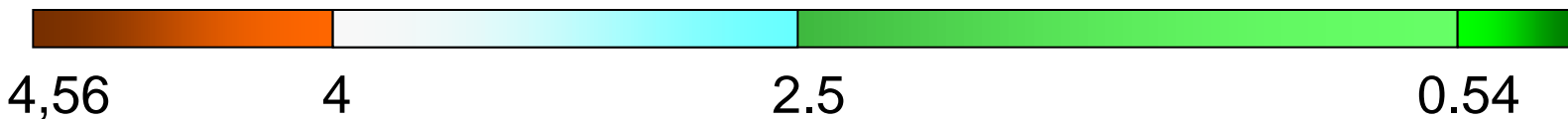


(Allwood et al., 2006, 2009)

- continent émergé et océan
- la plus ancienne trace de vie ? (Inclusions de graphite: δC^{13})

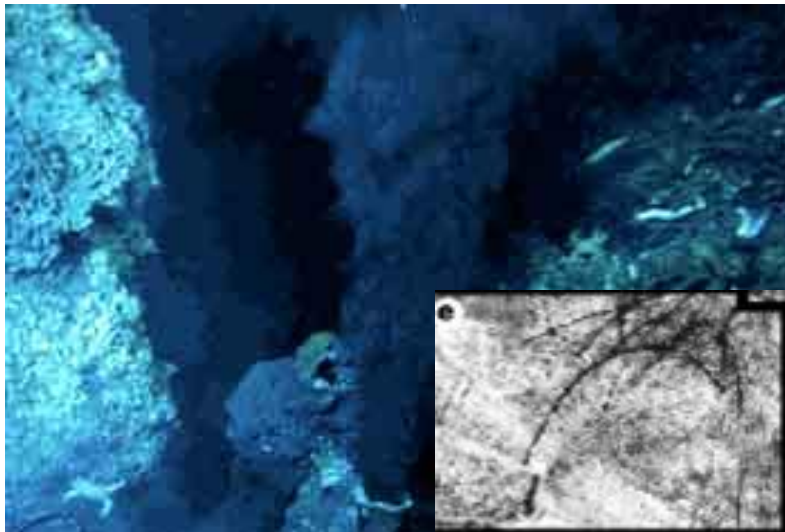
? pseudofossiles

stromatolites

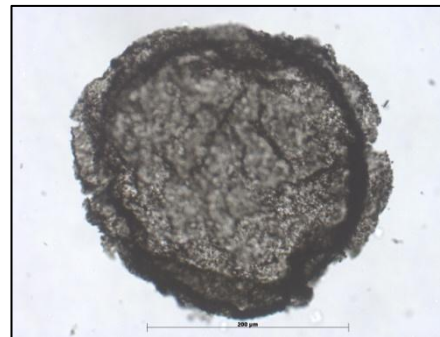
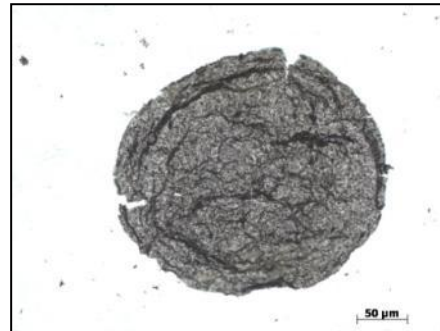


3.2 milliards d'années: la vie au fond, au chaud & près de la plage (Australie, Afrique du Sud)

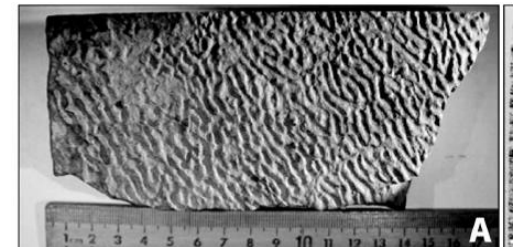
- microfossiles
- Structure biosédimentaire
- $\delta^{13}\text{C}$



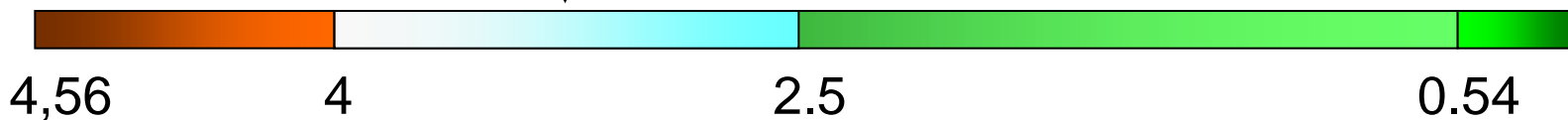
(Rasmussen et al., 2002)



(Javaux, et al 2010)



(Noffke et al., 2006)

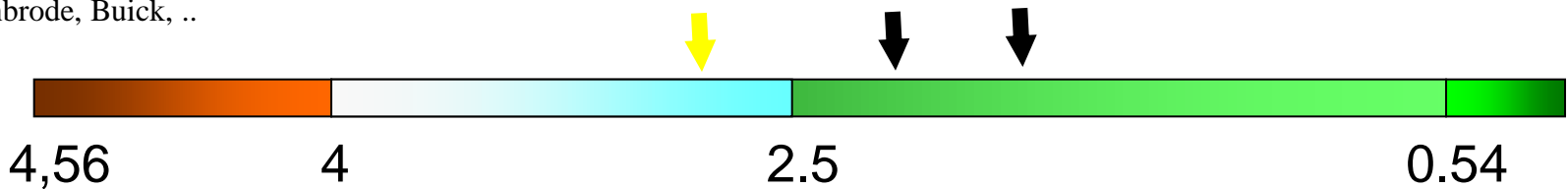


2.77 milliards d'années: molécules fossiles et stromatolites

The composite image includes several key elements:

- Globe:** Shows the Earth with a red dot indicating the location of Australia.
- Stromatolite:** A circular cross-section of a stromatolite showing concentric layers of microbial mats.
- Chemical Structure:** A complex polycyclic molecule with a red question mark, representing a fossilized hydrocarbon. The substituent R is defined as R = H, Me, Et.
- Carbon Skeleton:** A detailed numbered carbon skeleton (1-35) with a red square highlighting a specific carbon atom.
- Animal Cell Diagram:** A cross-section of an animal cell with labeled organelles: Nucleus, Nucleolus, Mitochondrion, Cytoskeleton, Golgi apparatus, Centrioles, Peroxisome, Plasma membrane, Smooth endoplasmic reticulum, and Rough endoplasmic reticulum.
- Rock Photograph:** A photograph of a dark, layered rock formation with a geological hammer for scale, credited to (@Lopez-Garcia).

Brocks et al., 1999;
Summons @geobiology.mit.edu
>>Rasmussen et al, 2008; Ragby et al, 2009
Mais Waldbauer et al, 2009
Eigenbrode, Buick, ..



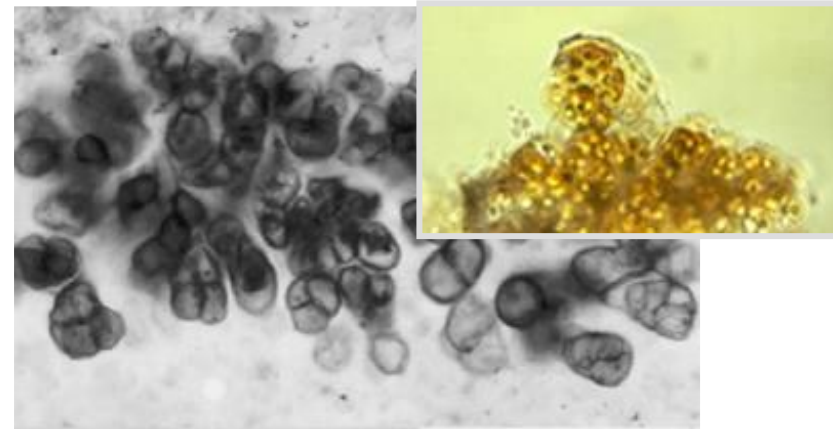
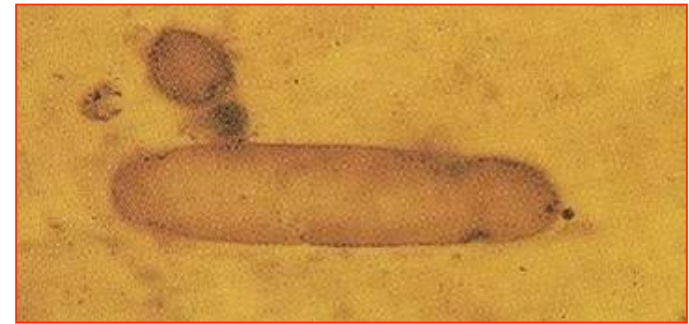
Oxygénation de l'atmosphère !

preuves géologiques & géochimiques depuis 2.5 Ga
microfossiles de cyanobactéries depuis 2.1 Ga

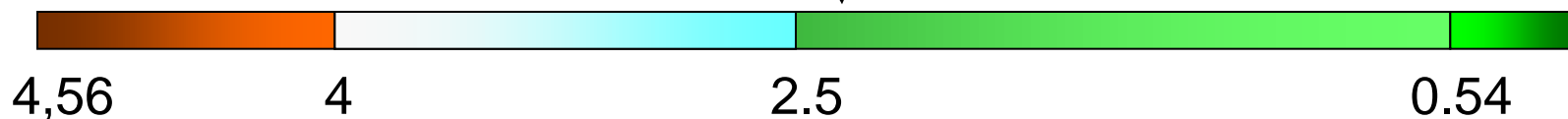


(@Javaux)

« red beds » dunes éoliennes,
Karélie, 2.2 Ga

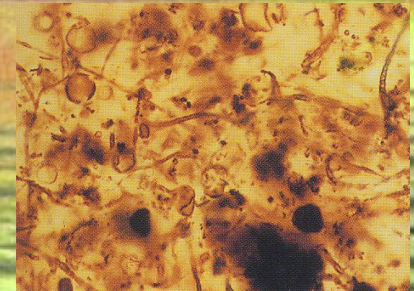
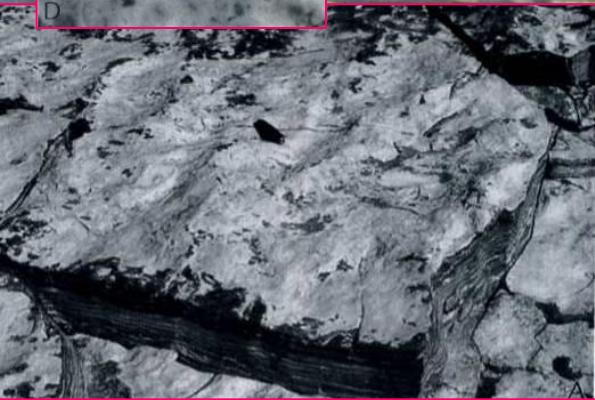
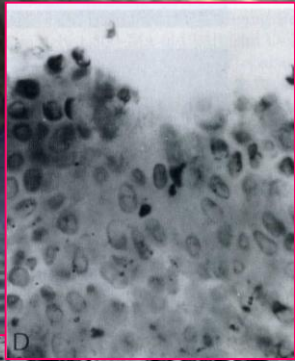


(@Knoll, 2003)



2.1-1.9 Ga

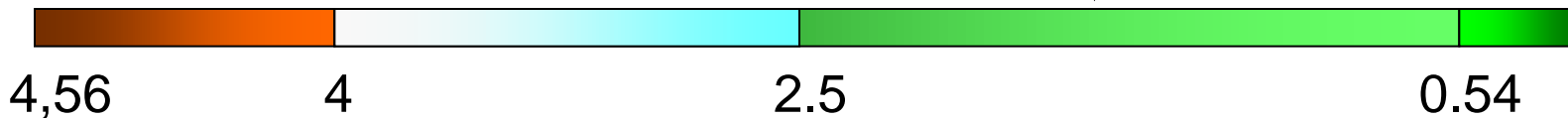
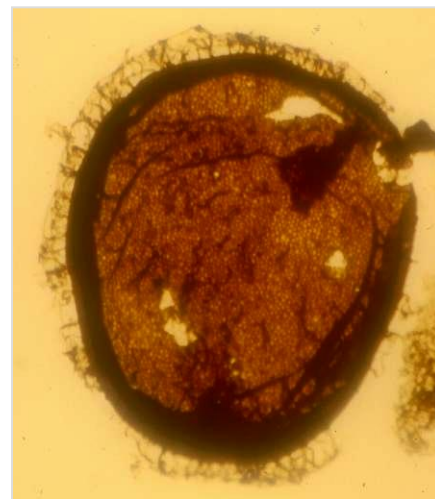
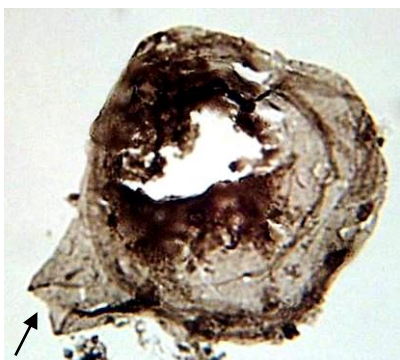
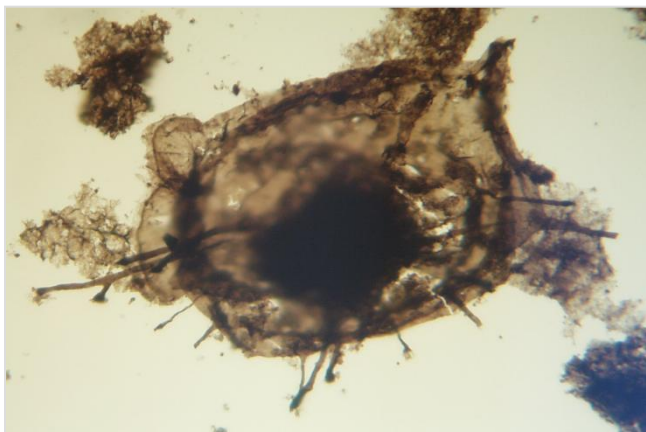
la vie coexiste dans des eaux oxygénées
(cyanobactéries, colonies) et anoxiques ferrugineuses



Morphological and ecological complexity in early eukaryotic ecosystems

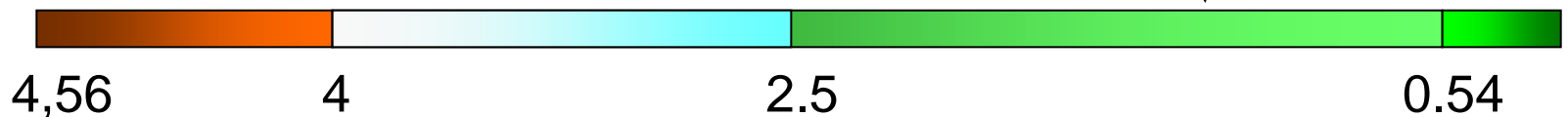
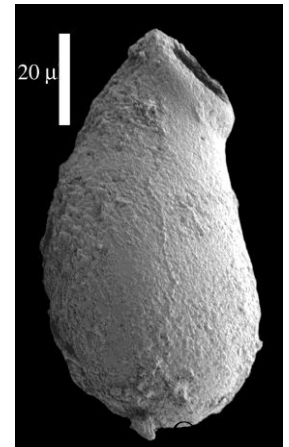
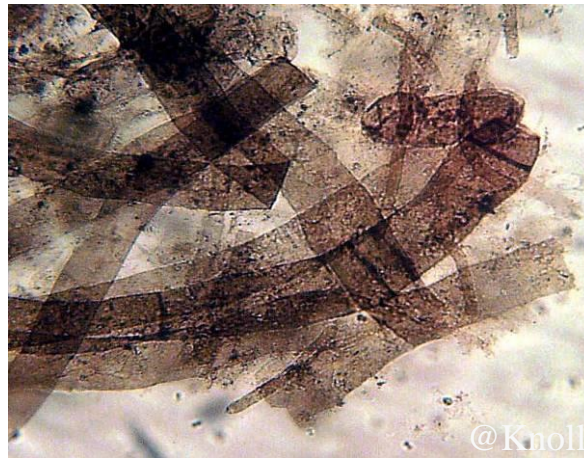
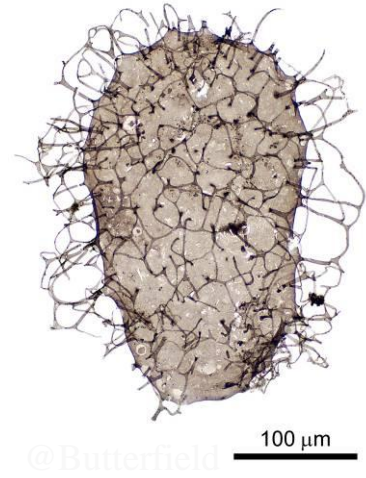
Emmanuelle J. Javaux*, Andrew H. Knoll* & Malcolm R. Walter†

1.8-1.5 milliards d'années: des microfossiles d'eucaryotes

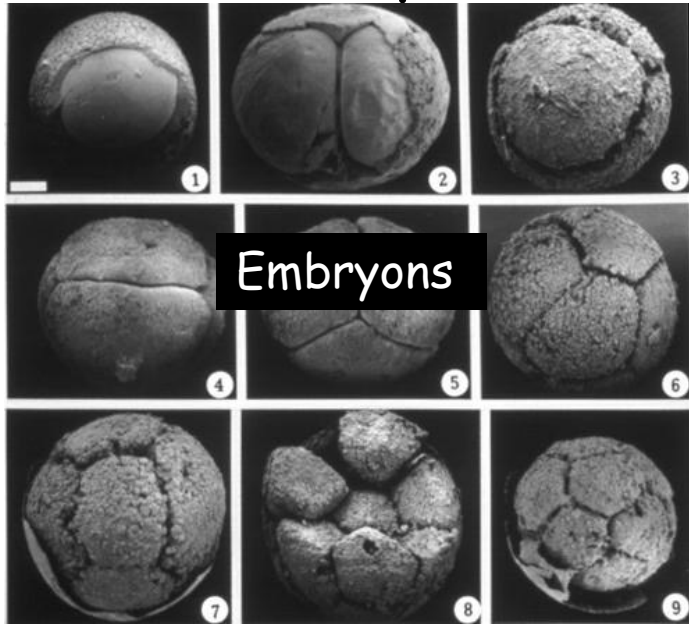


(Javaux et al, Nature 2001; Knoll et al, 2006)

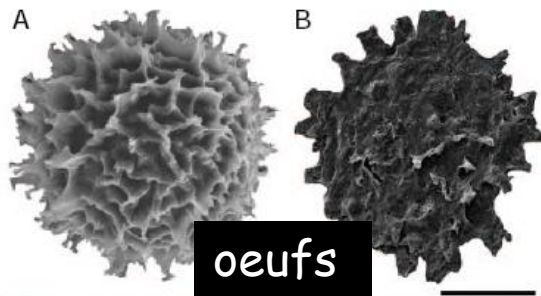
1.2- 0.8 milliards d'années: Protistes, algues multicellulaires et (?) champignons



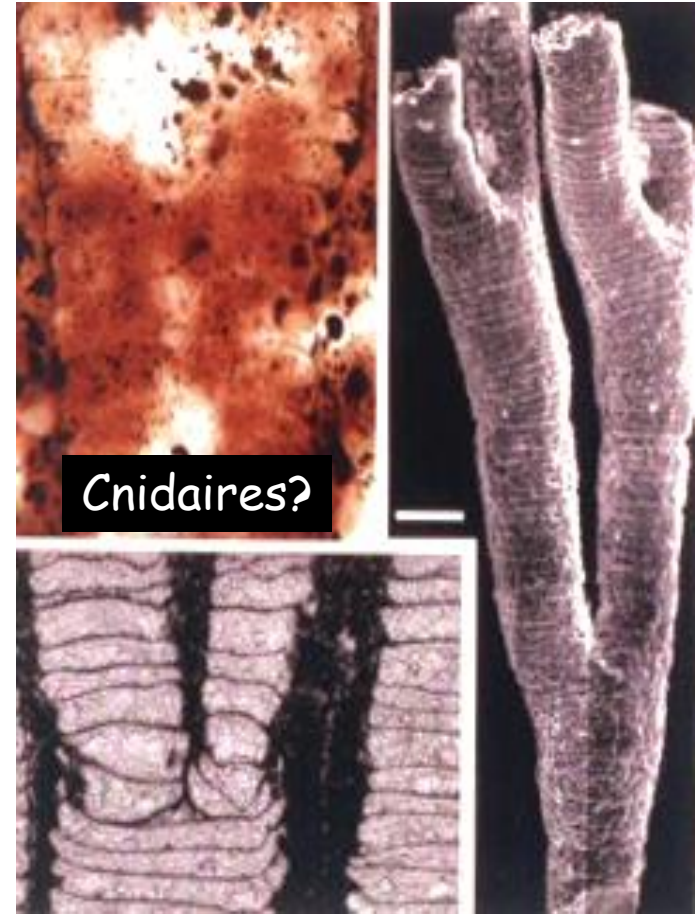
600 millions d'années (Ma): Les premiers animaux microscopiques



(Xiao et al 2007)

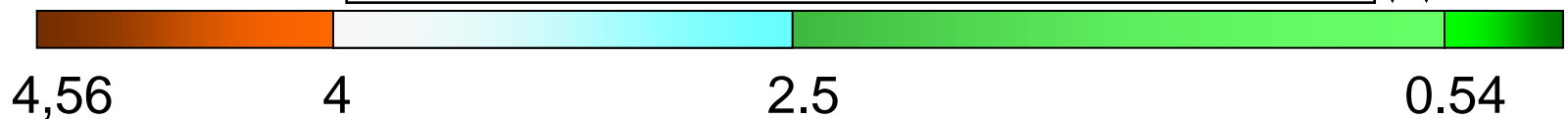


(Cohen et al 2009)



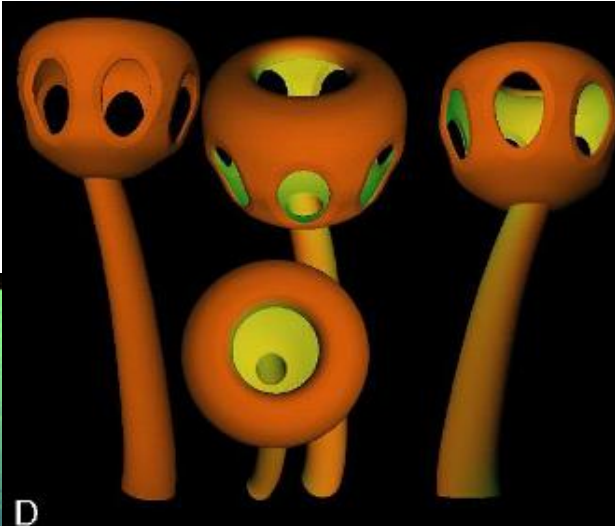
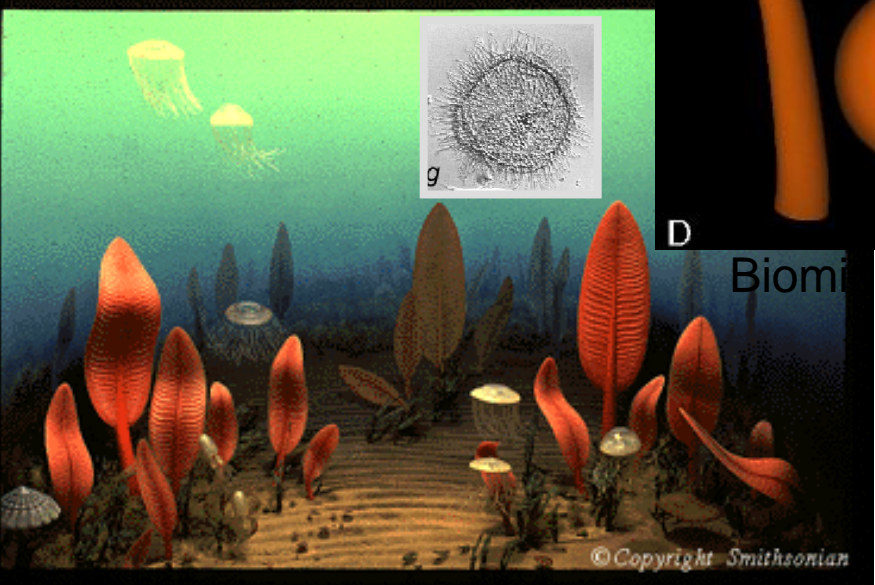
(Xiao et al 2007)

635 Ma Biomarqueur éponge (Love et al 2009) ↓↓

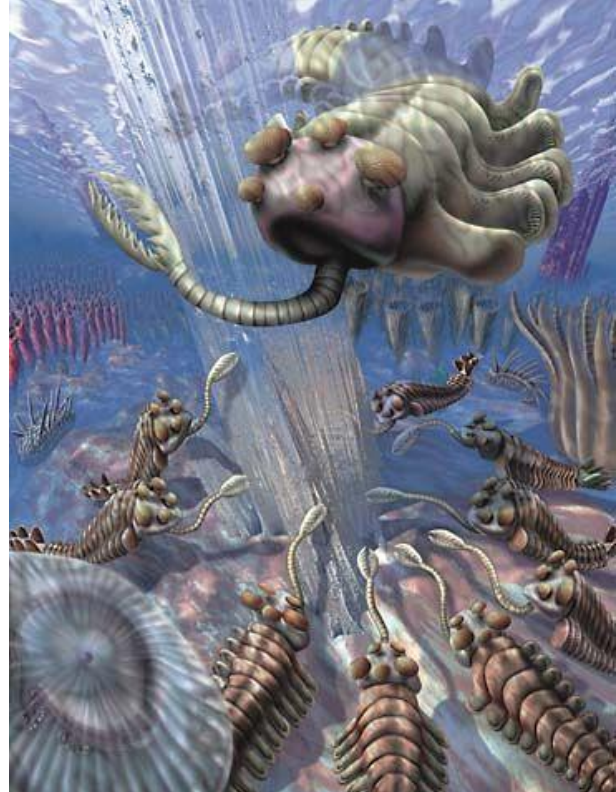


Vie précambrien/Phanérozoïque

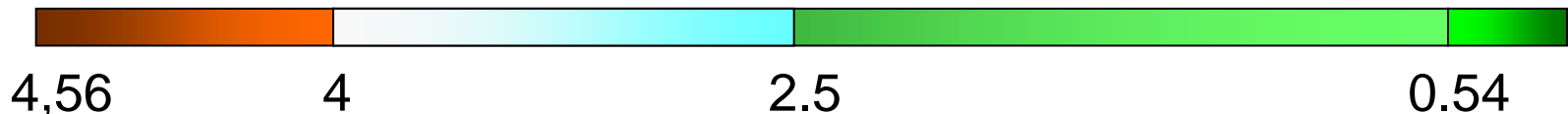
Faune d'Ediacara
570 Ma



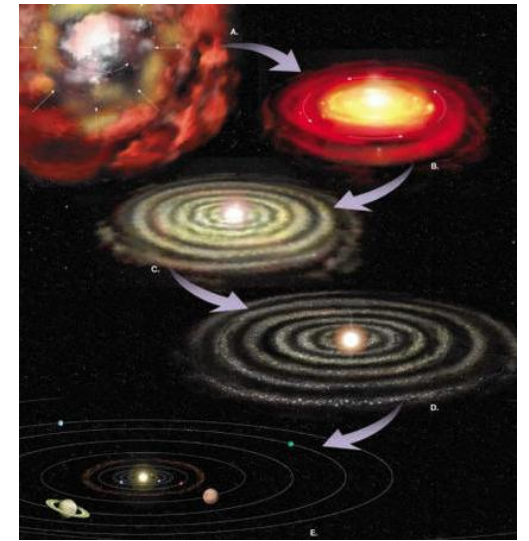
Biomérisation animale
549 Ma



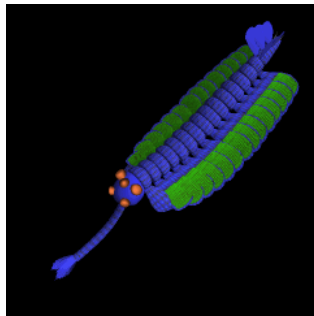
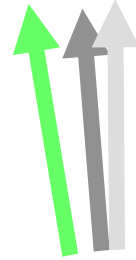
Diversification animale
500 Ma



horloge de la vie



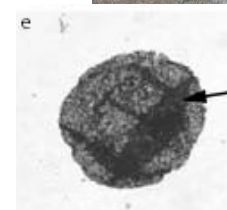
11H58



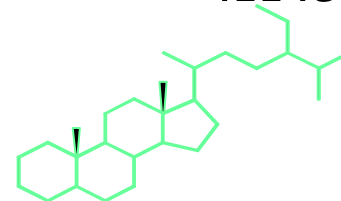
10H25



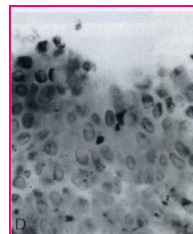
Vie 2H45



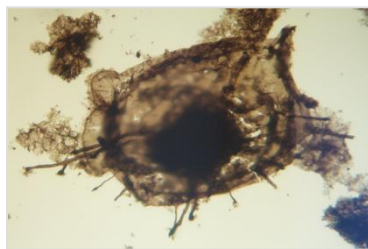
4H45



7H00



9H00



merci

