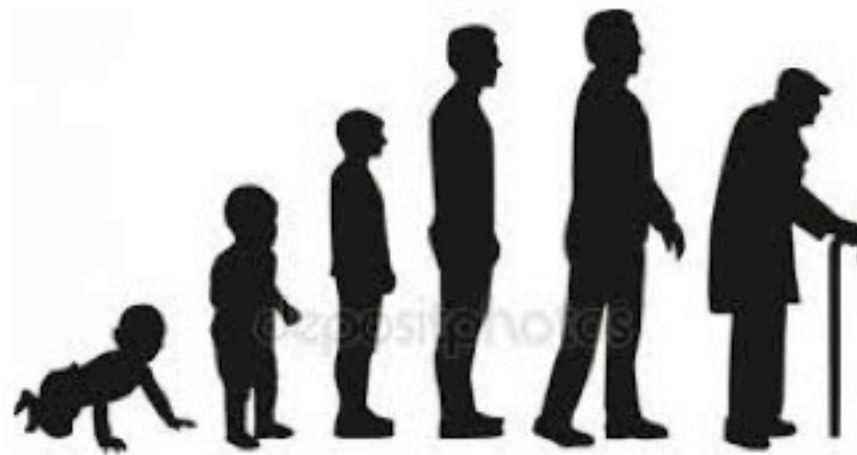


# Origine de la vie sur Terre: lien avec la composition de l'atmosphère

*Pascal Philippot - Directeur de Recherches au CNRS*  
[pascal.philippot@umontpellier.fr](mailto:pascal.philippot@umontpellier.fr)



## Echelle de temps



Evolution de la vie d'un homme. *100 ans = 5200 semaines*



Terre primitive



Terre moderne



Evolution de la Terre. *4560 millions d'années*

***1 million d'années de la vie de la Terre ~ 1 semaine de la vie d'un homme***



Terre primitive  
(jeune)



Bébé



Terre moderne  
(vieille)



Vieil homme



Age



4560 Ma

4000 Ma

2500 Ma

540 Ma

0 Ma

HADEEN

ARCHEEN

PROTEROZOIQUE

PHANERO  
ZOIQUE

100 ans

77ans

50 ans

10 ans

Aujourd'hui

Temps



Qu'est ce qui fait que la Terre est différente  
des autres planètes telluriques?



Mercury



Vénus



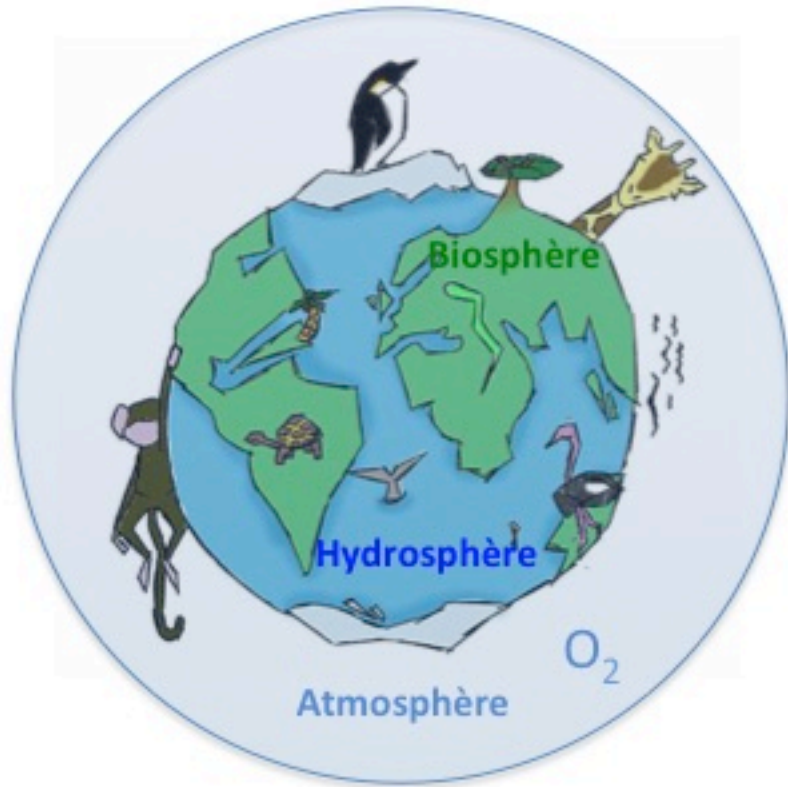
Terre



Mars

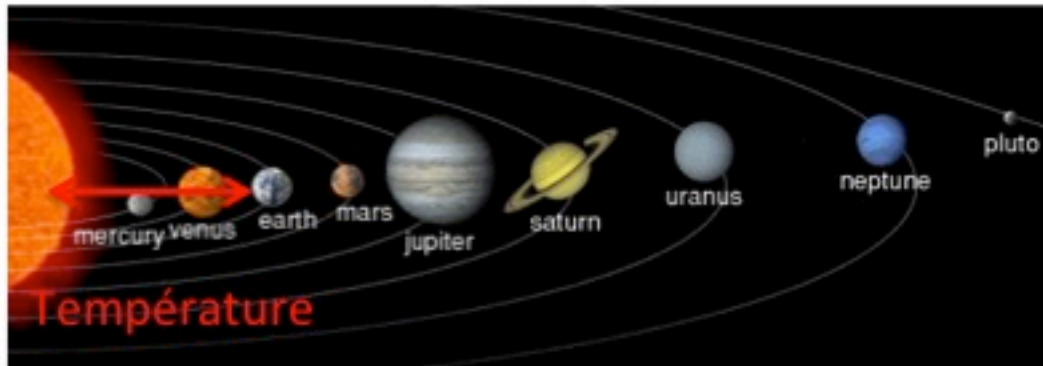


## Tectonique des plaques et vie (oxygène)

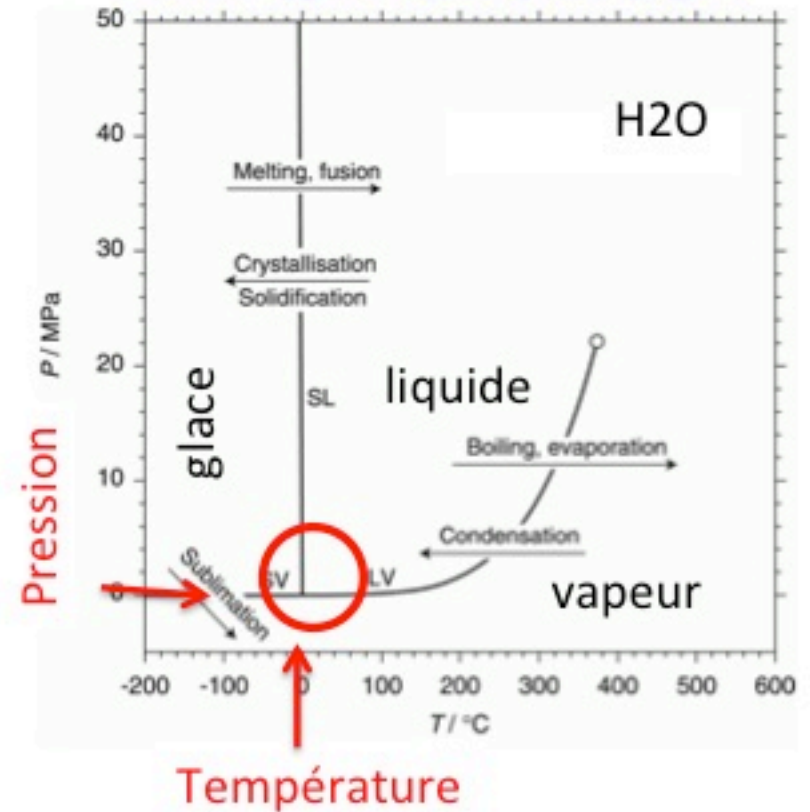
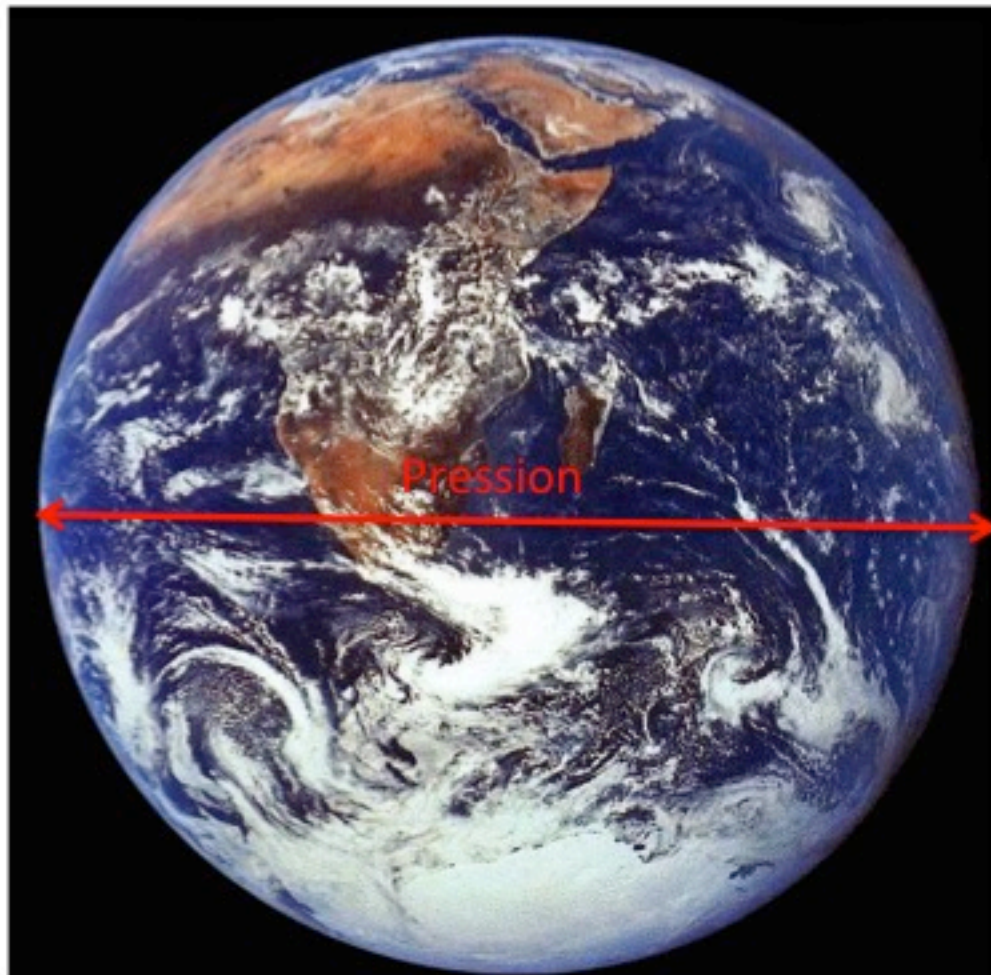


Lithosphère continentale

Lithosphère océanique



## l'eau sur Terre Solide (glace), liquide, gaz



Une situation en terme de pression  
atmosphérique et température très particulière

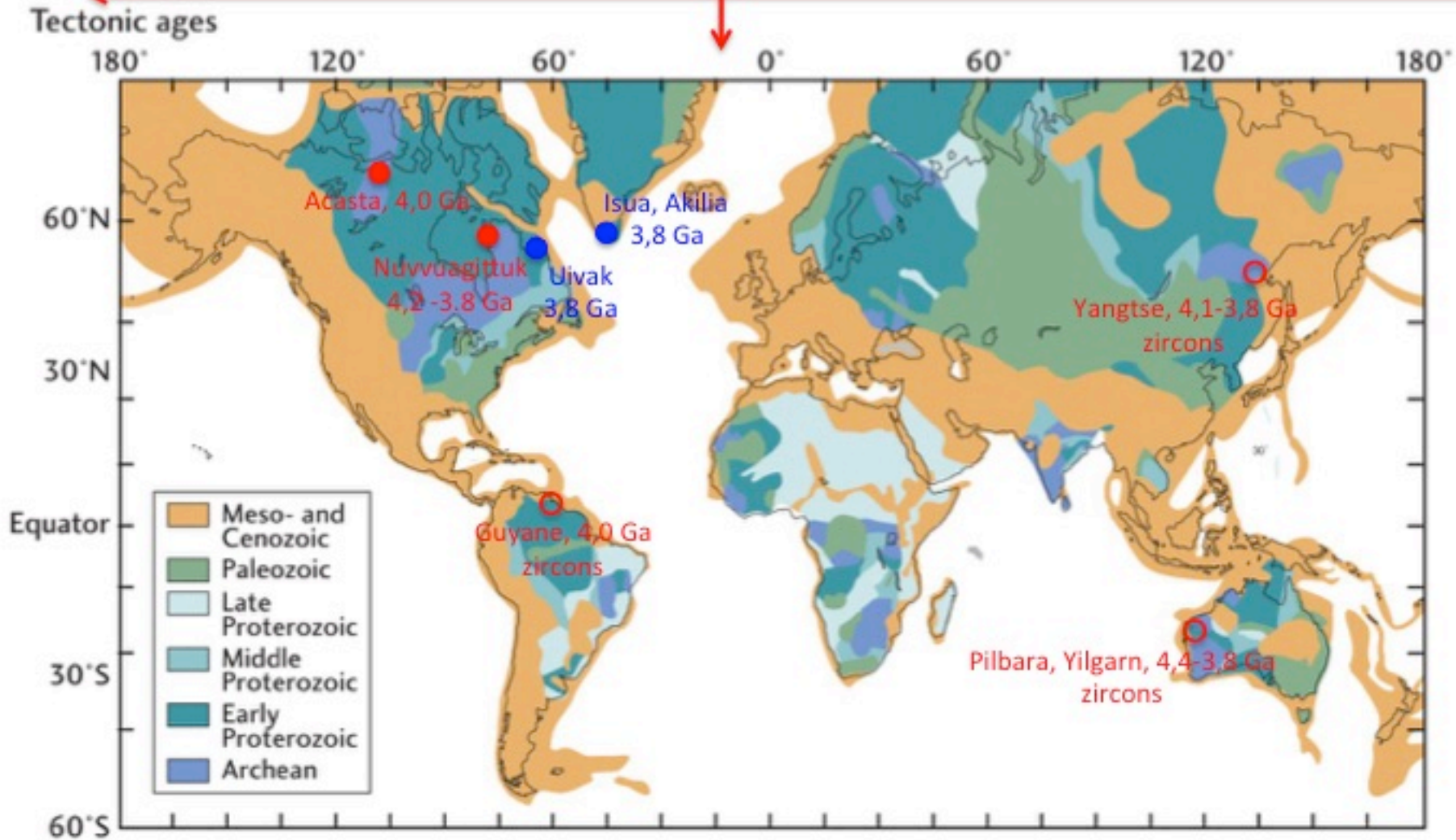
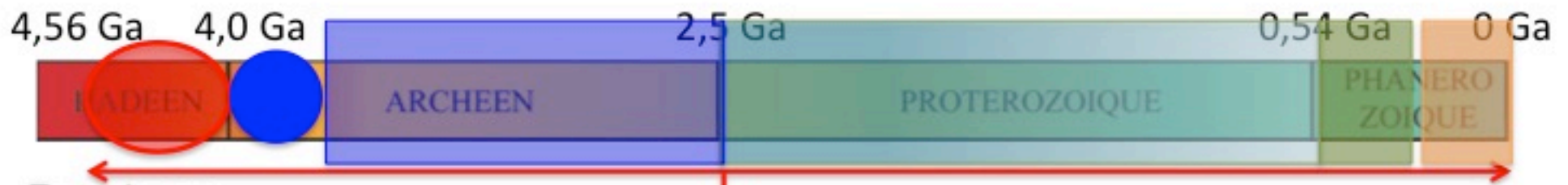
bonne distance au Soleil (température)  
bonne densité et taille (pression)

## La planète bleue









Lithosphère continentale = 0 à 4200 Ma (4400 Ma)

# Ceinture crustale de Nuvvuagittuq, 4,2 à 3,8 Ga



4,56 Ga ↓ 4,0 Ga

2,5 Ga

0,54 Ga

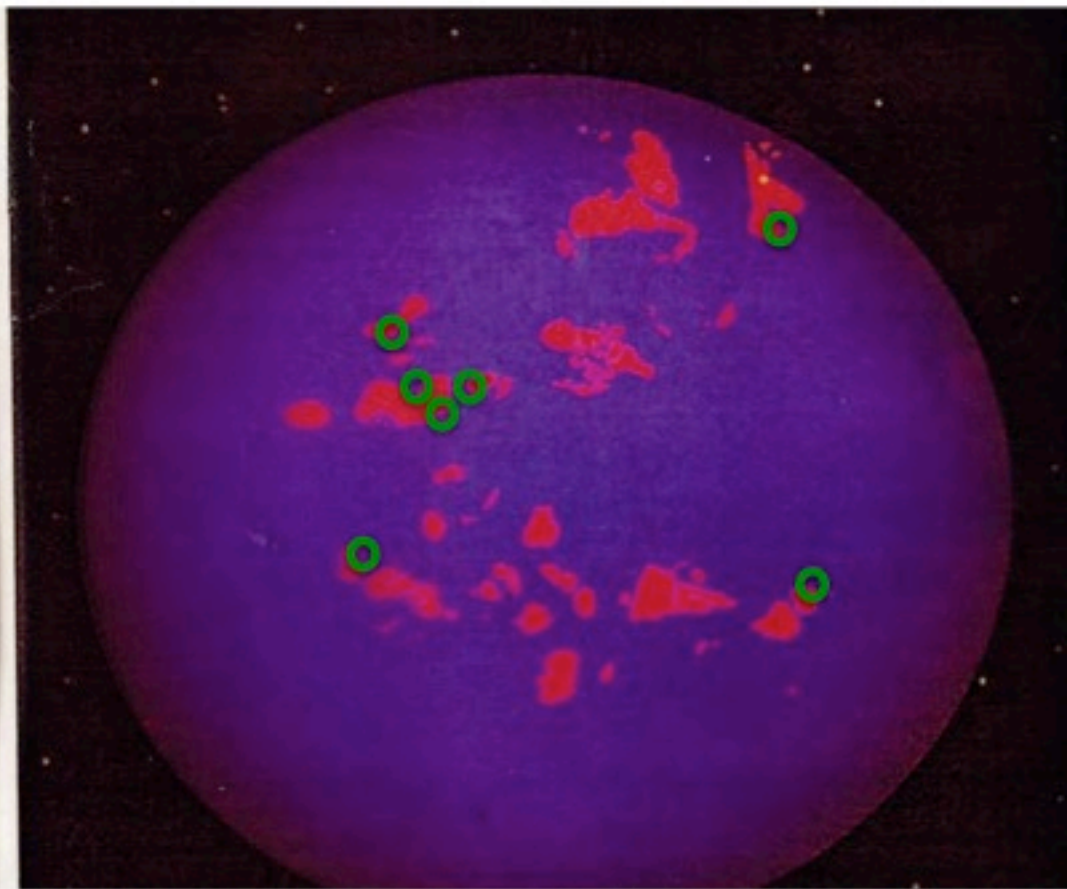
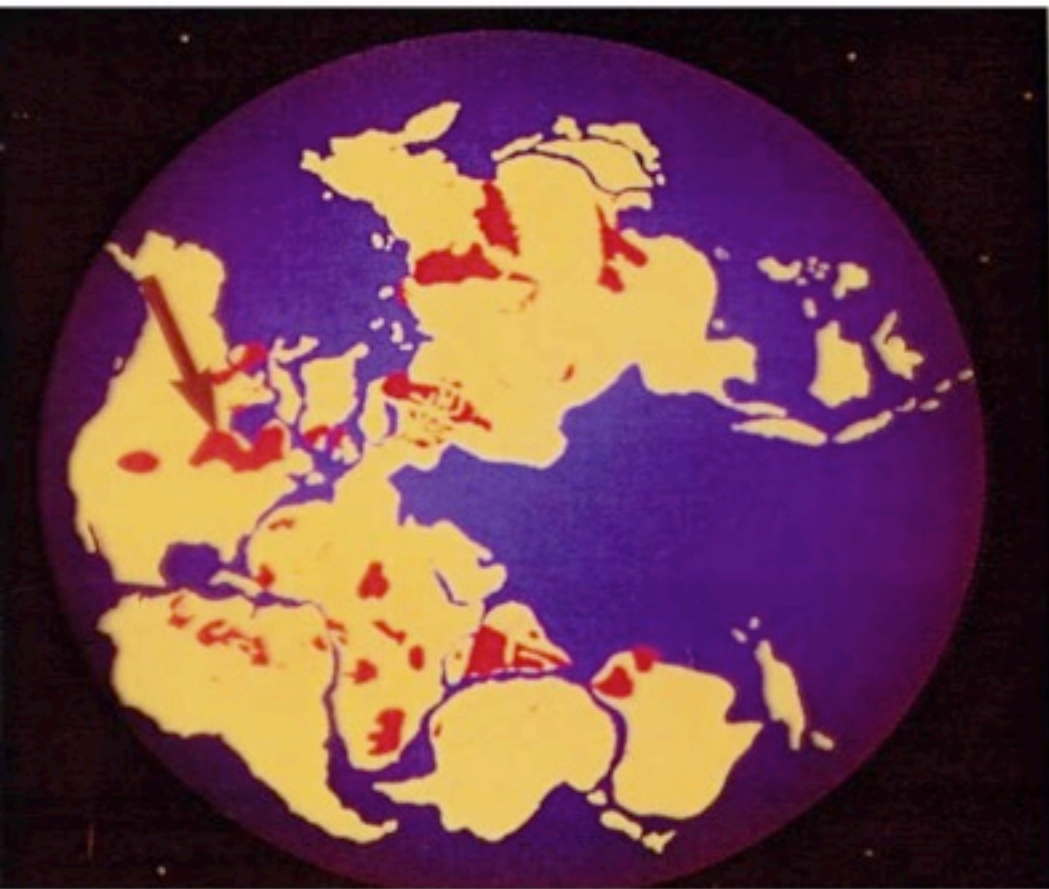
0 Ga



Les continents actuels représentent 30% de terres émergées

Méso et Néoarchéen (3.6 à 2.5 Ga), ~ 7 %

Paléoarchéen et Hadéen (4.56 à 3.6 Ga) << 1%

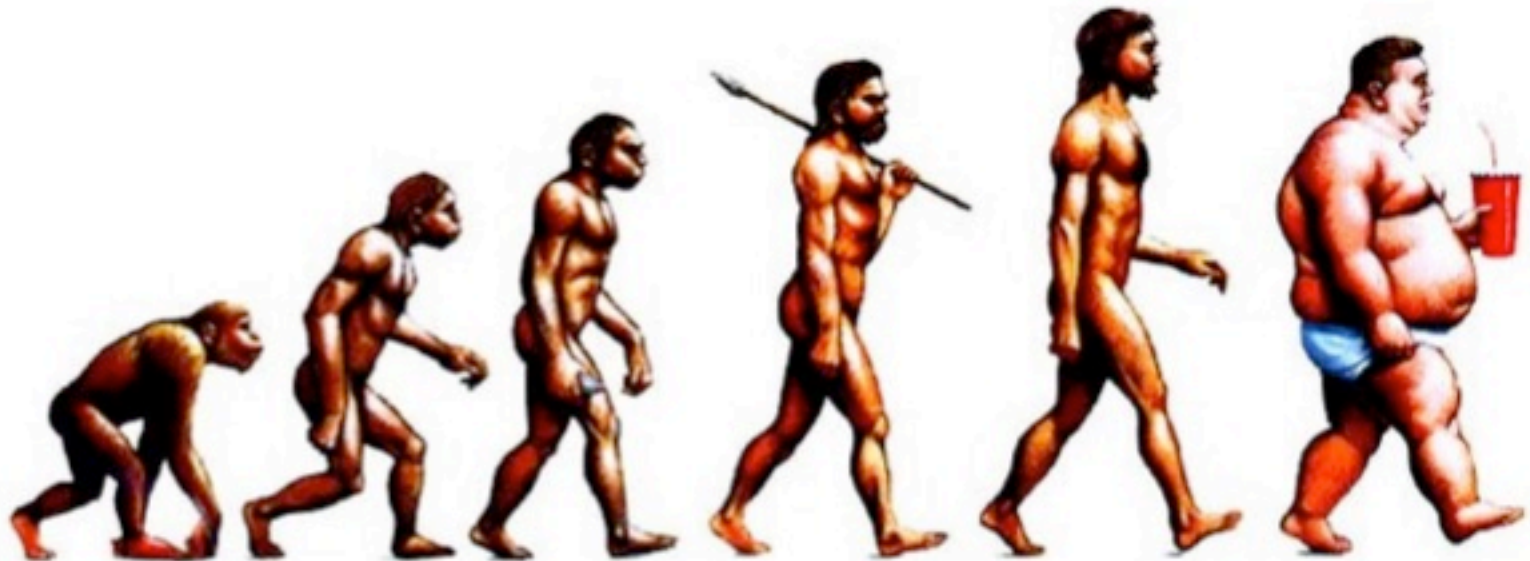


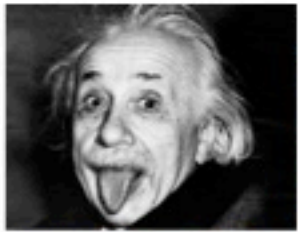
# Recherche des premières traces de vie sur Terre

Qu'est ce que la vie?

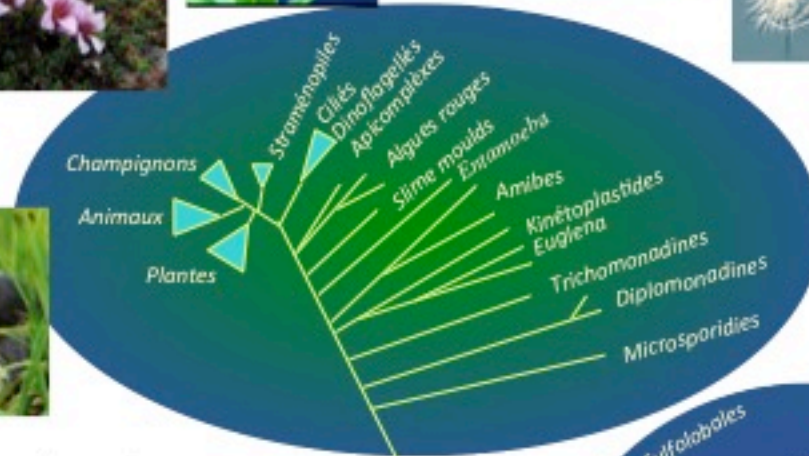
Une structure qui a la capacité de produire des copies d'elle-même sans perdre de l'information (**reproduction**). Le paramètre fondamental étant que parfois cette structure se trompe dans sa réplification (**mutation**), ce qui lui permet une évolution de type Darwinienne.

*La théorie de l'évolution*

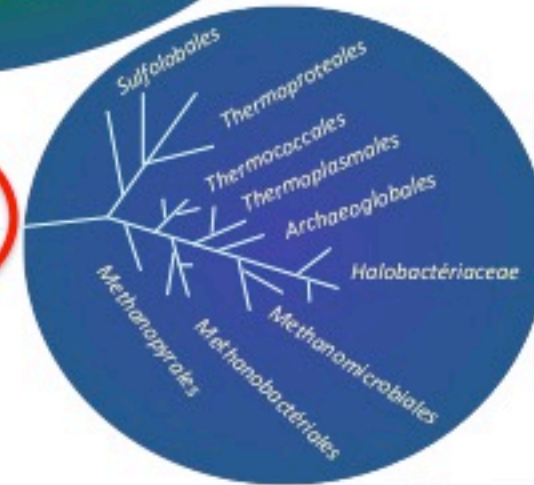




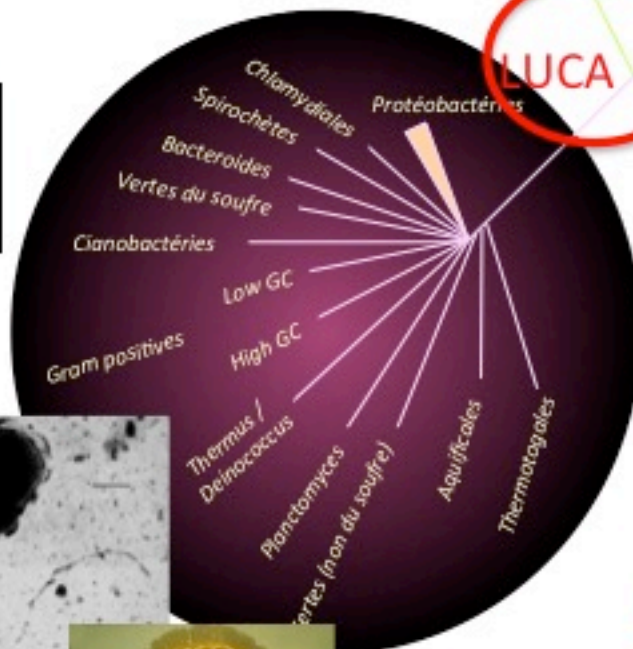
L'arbre du vivant



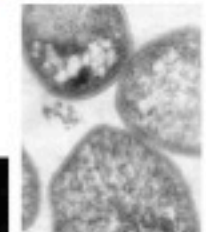
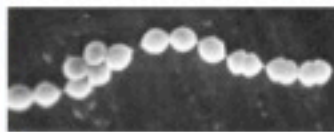
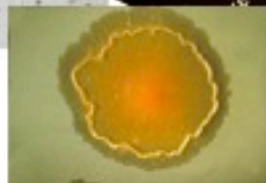
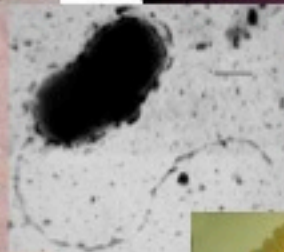
**Eukarya**  
(eucaryotes)



**Archaea**  
(archées)



**Bacteria**  
(bactéries)

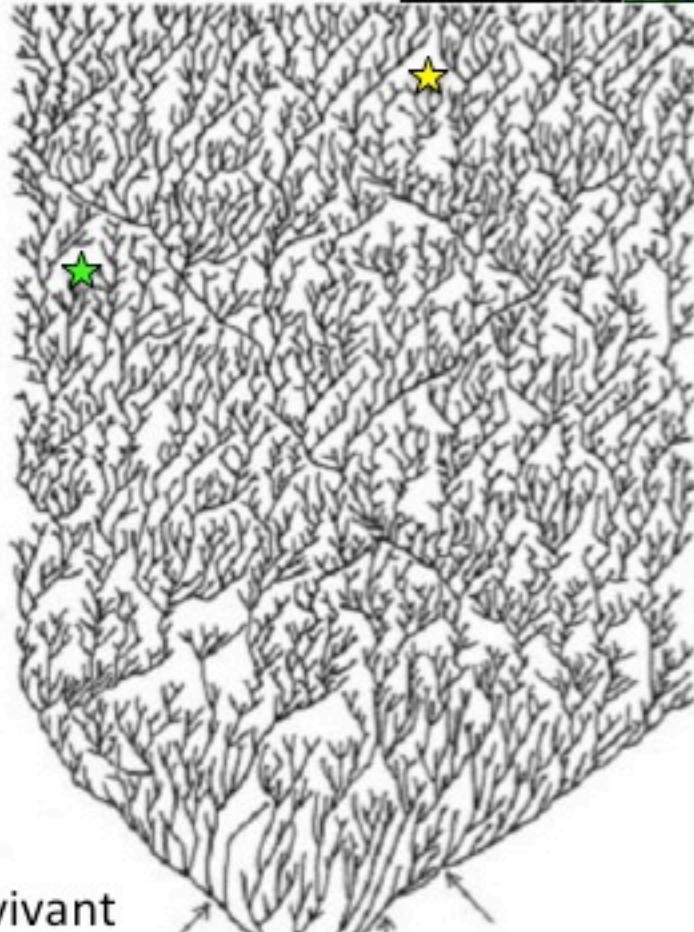


LUCA = Last Universal Common Ancestor

Espèces vivantes



Espèces éteintes



Arbre du vivant

LUCA

?

Premiers êtres vivants (origine)

**LUCA = l'ancêtre commun universel**

Ce n'est pas le premier organisme mais le dernier ancêtre commun à tous les êtres vivants

*Pour le moment on n'a pas trouvé un être vivant avec un patrimoine génétique unique*

**Quel âge a LUCA?  
A quoi ressemblait-il?**

*L'origine de la vie et le premier ancêtre commun sont deux choses distinctes*




Quels sont les ingrédients de la vie?



(Carbone Inorganique)



Energie



Redox,  $\Delta G_{rx} = - nF \Delta E^{\circ}$

Lumière,  $E = h\nu$

+ répllication et stockage de l'information

Depuis quand a t'on de l'eau  
liquide sur Terre?

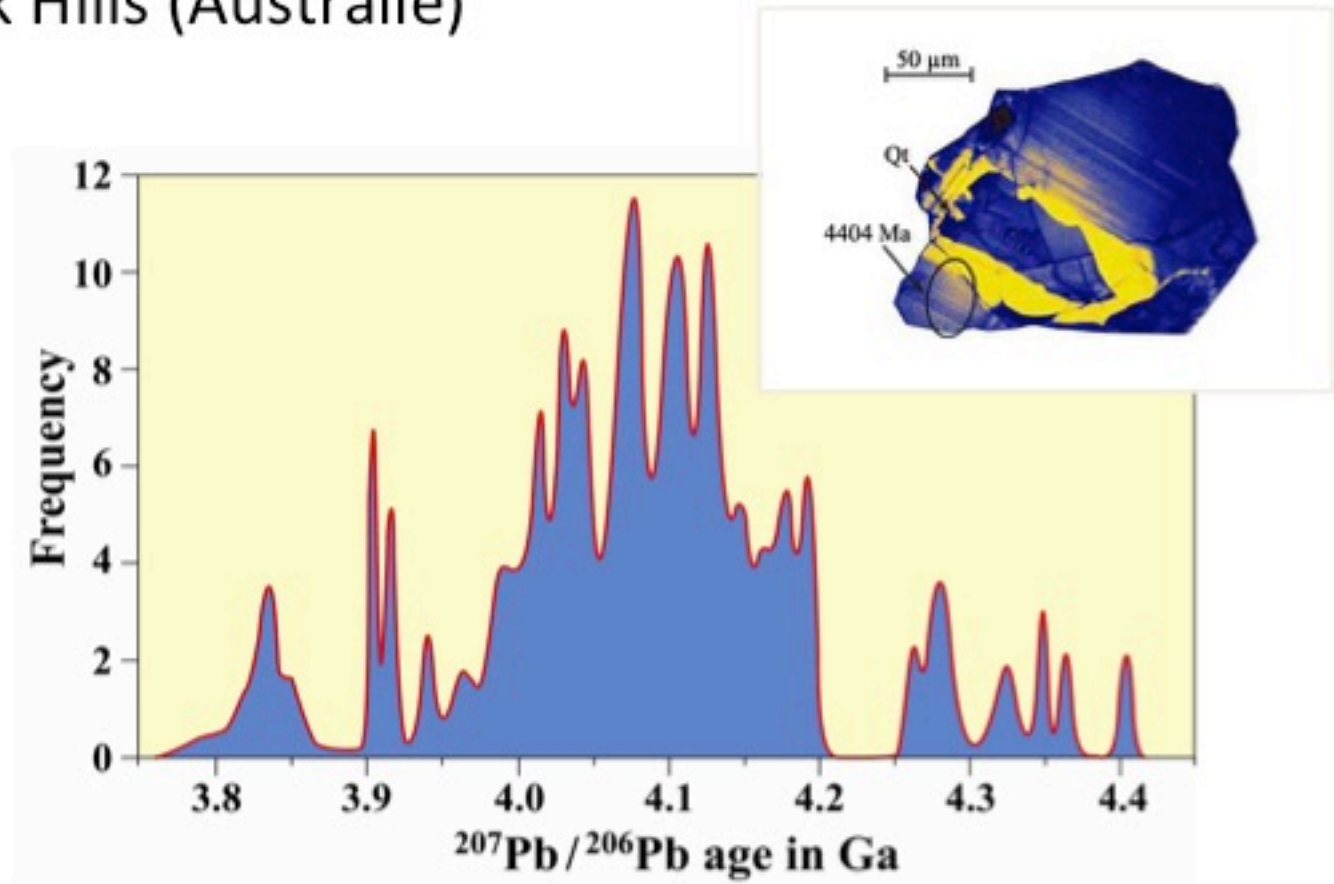
# Les zircons de Jack Hills (Australie)



Zircon,  $ZrSiO_4$

Très réfractaire à l'altération

**Minéral typique des roches différenciées types granitoïdes**



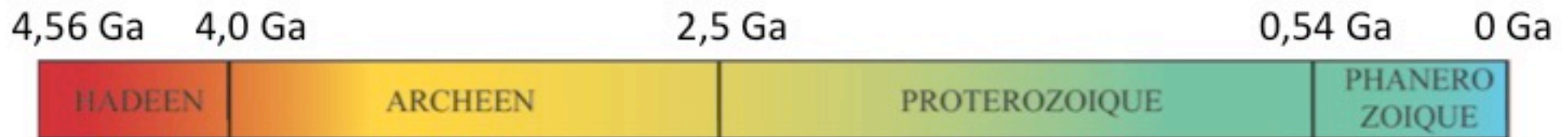
Les datations U-Pb donnent des âges entre 3,8 et 4,4 Ga

Aujourd'hui, les granitoïdes (zircons) qui constituent la croûte continentale se forment au niveau des zones de subduction par fusion du manteau lithosphérique contaminé par de l'eau ou un magma hydraté (basalte) libéré de la plaque plongeante.

Pour fondre/déshydrater une plaque océanique, il faut qu'elle se soit chargée en eau et donc qu'elle se soit refroidie avant 4,4 Ga



Les zircons de Jack Hills en Australie suggèrent la présence d'eau liquide dès 4,4 Ga, soit 150 Ma après la formation de la Terre



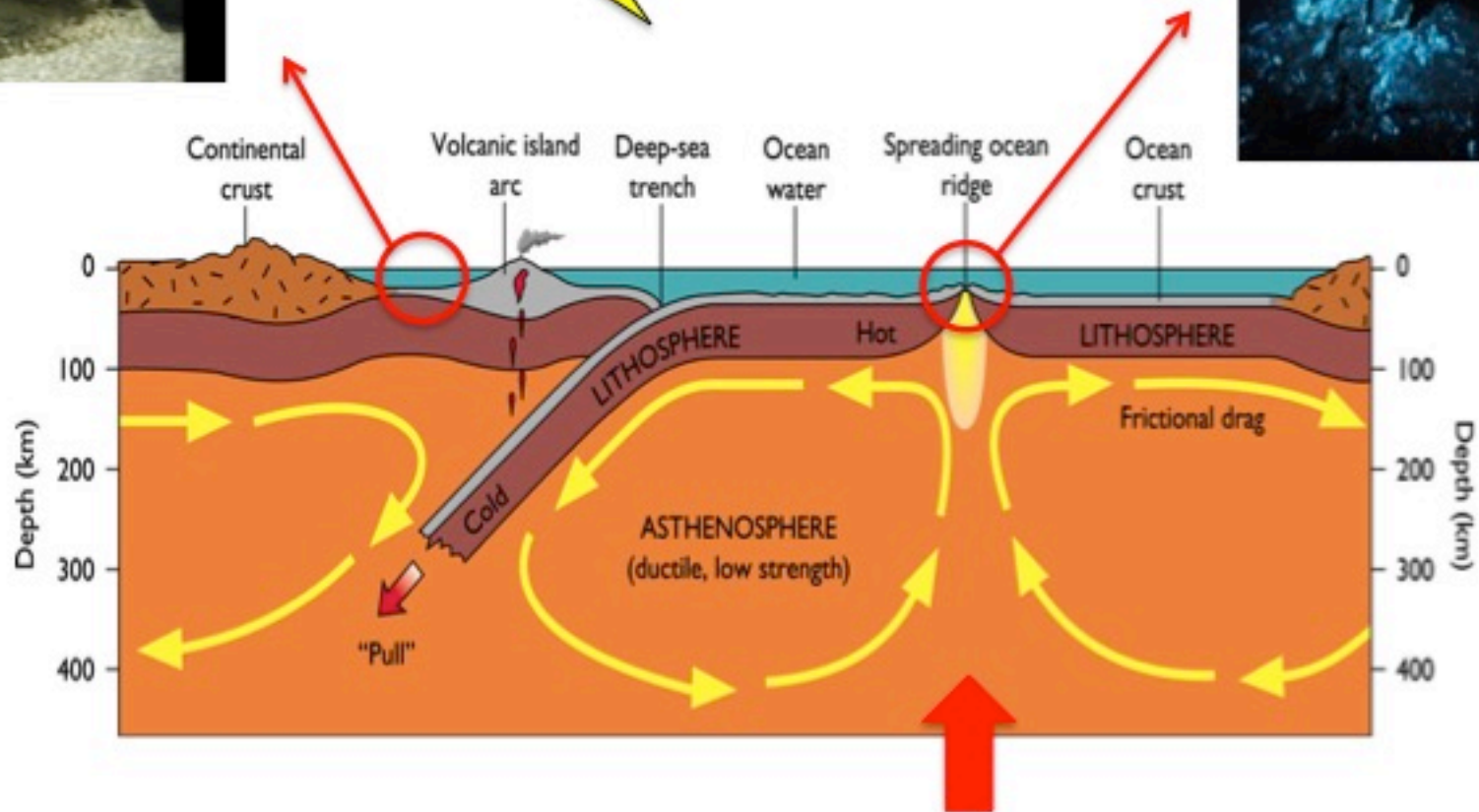
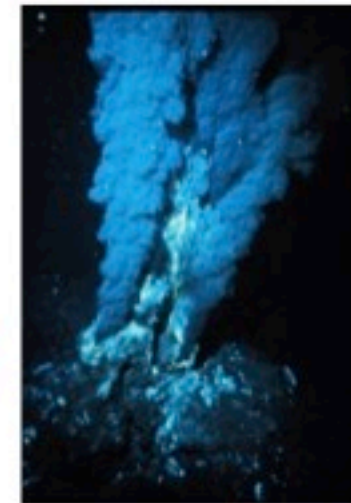
Energie?

# Energie solaire et chimique illimitées

Energie solaire

Chimiotrophie  
redox  $\Delta G_{rx} = -nF \Delta e^{\circ}$

Photosynthèse,  $E = hv$



Chaleur interne (production radiogénique)



# Matière organique?

Sources endogène et exogène abondantes

- Atmosphère (expériences de Miller)
- Events hydrothermaux sous marins (Réactions de Fischer-Tropsch)
- Météorites et comètes (très riches en MO – bombardement continu)

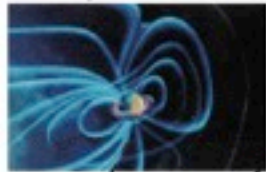
Plus vieux zircons  
Présence d'eau liquide?



Bombardement  
tardif



Dynamo?



Formation de la Terre  
4.56 Ga

4.0

3.0

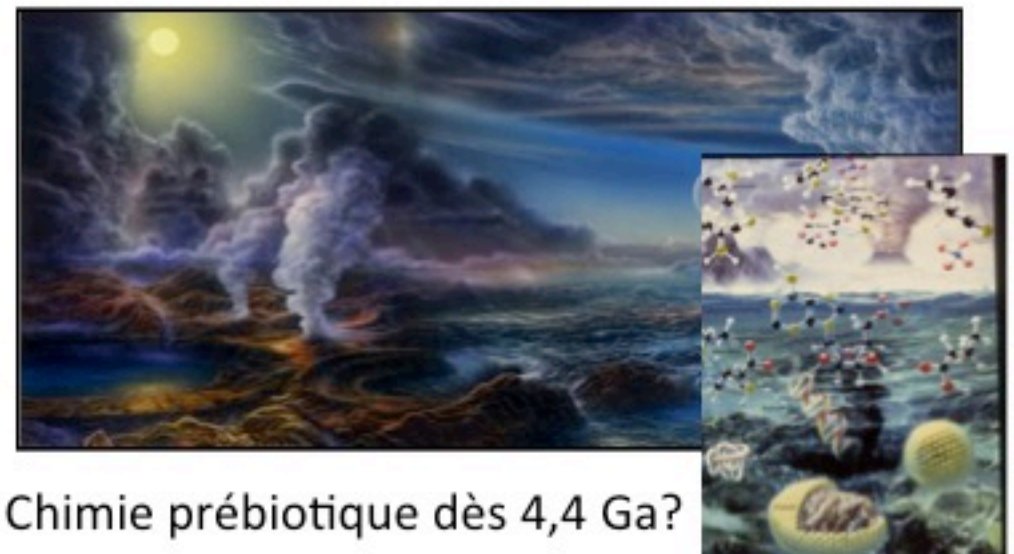
2.0

1.0

0 Ga



Plus vieux sédiments



Chimie prébiotique dès 4,4 Ga?

Formation de la Terre



# Histoire de la Terre et du vivant

Terre actuelle



4560 Ma 4000 Ma

2500 Ma

540 Ma 0 Ma

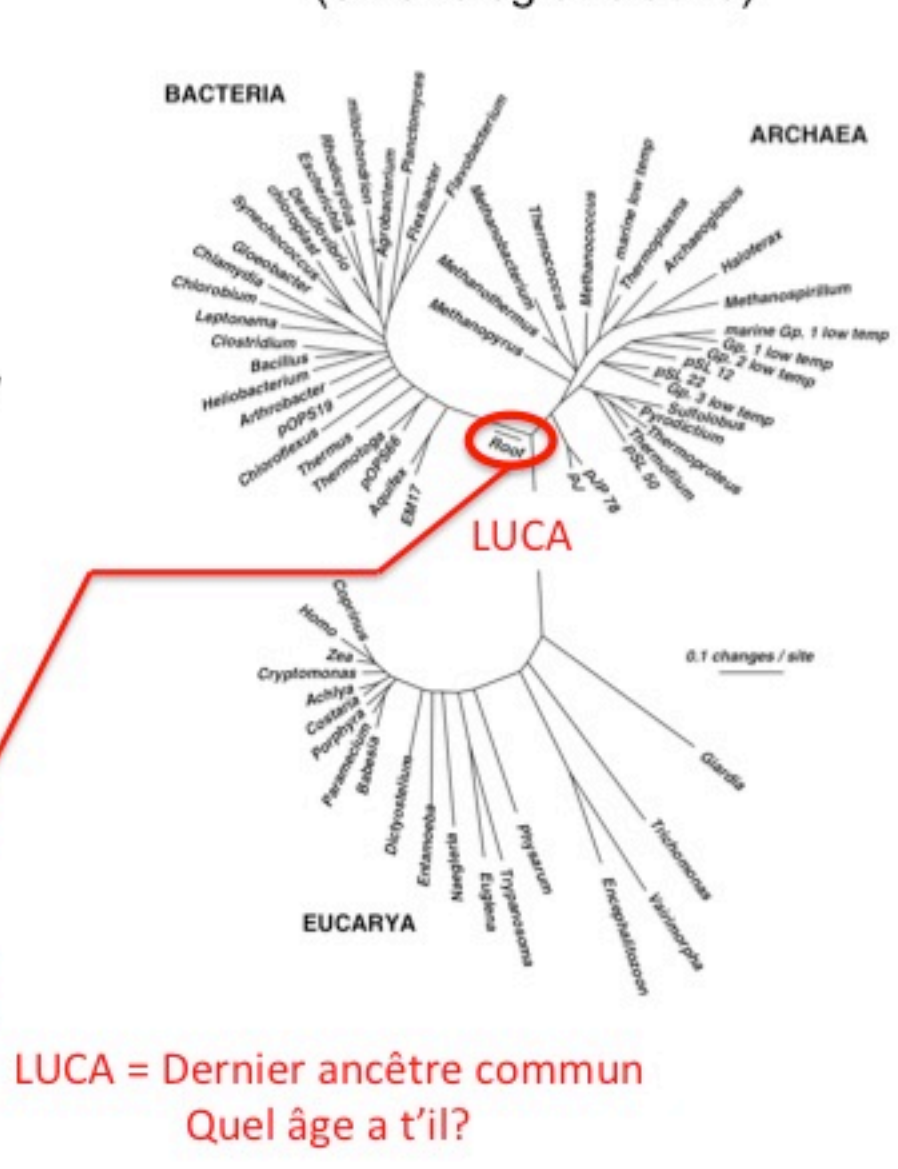
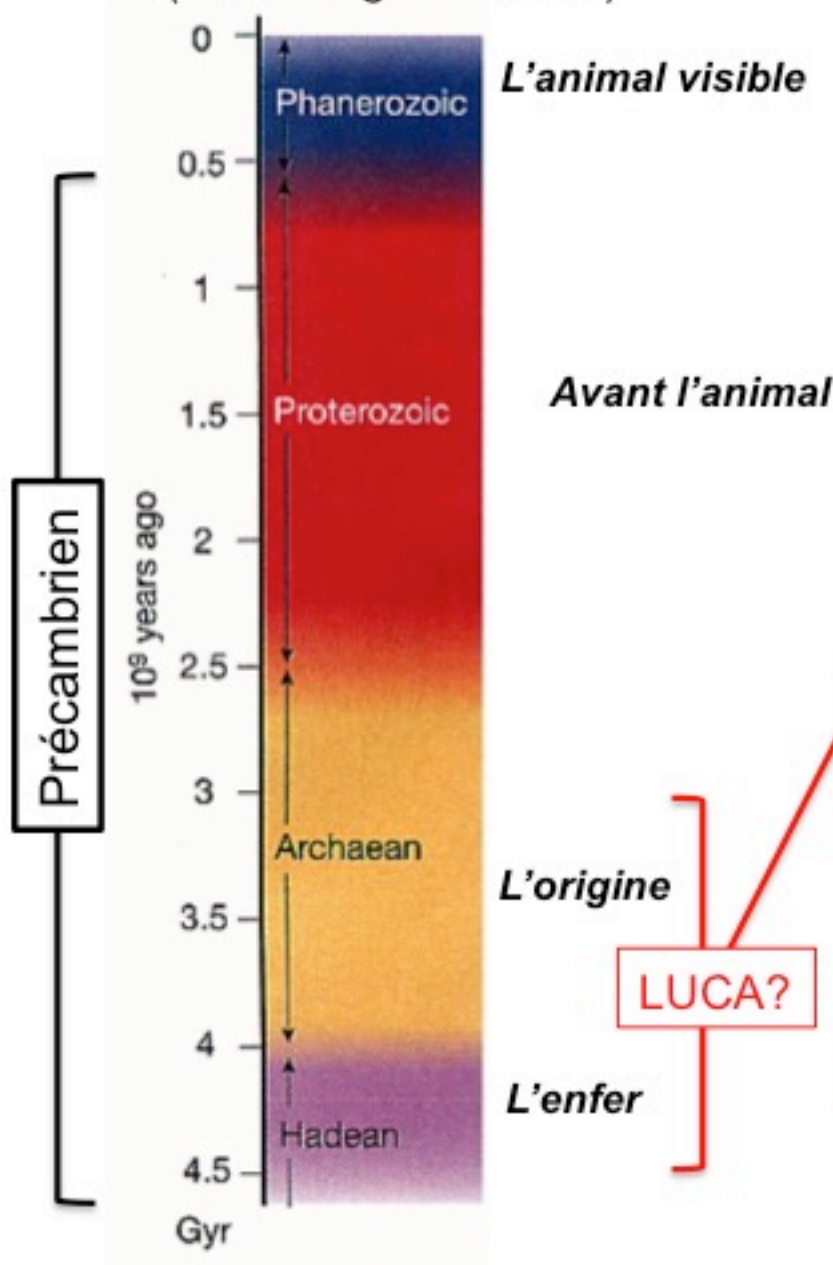


Quel âge a le premier être vivant?  
→ Faire le lien entre registre  
géologique et biologique



# Histoire de la Terre (chronologie absolue)

# Histoire de la vie (chronologie relative)



LUCA?

LUCA = Dernier ancêtre commun  
Quel âge a t'il?

4546 Ma 4000 Ma

2500 Ma

540 Ga

0 Ma



On connaît bien ce que l'on voit



Animaux avec carapaces ou squelettes, Cambrien 540 Ma

4000 Ma d'années séparent l'apparition du premier organisme à carapaces et la formation de la Terre...

Formation de la Terre, 4560 Ma

Photosynthèse oxygénique par les plantes terrestres



7 Ma. Hominidés



Mammifères

Plantes

542Ma. Explosion cambrienne du vivant



Animaux



Faune édiacarienne  
745-540 Ma

Photosynthèse oxygénique

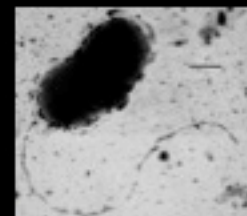
Vie  
Multicellulaire  
1800 Ma



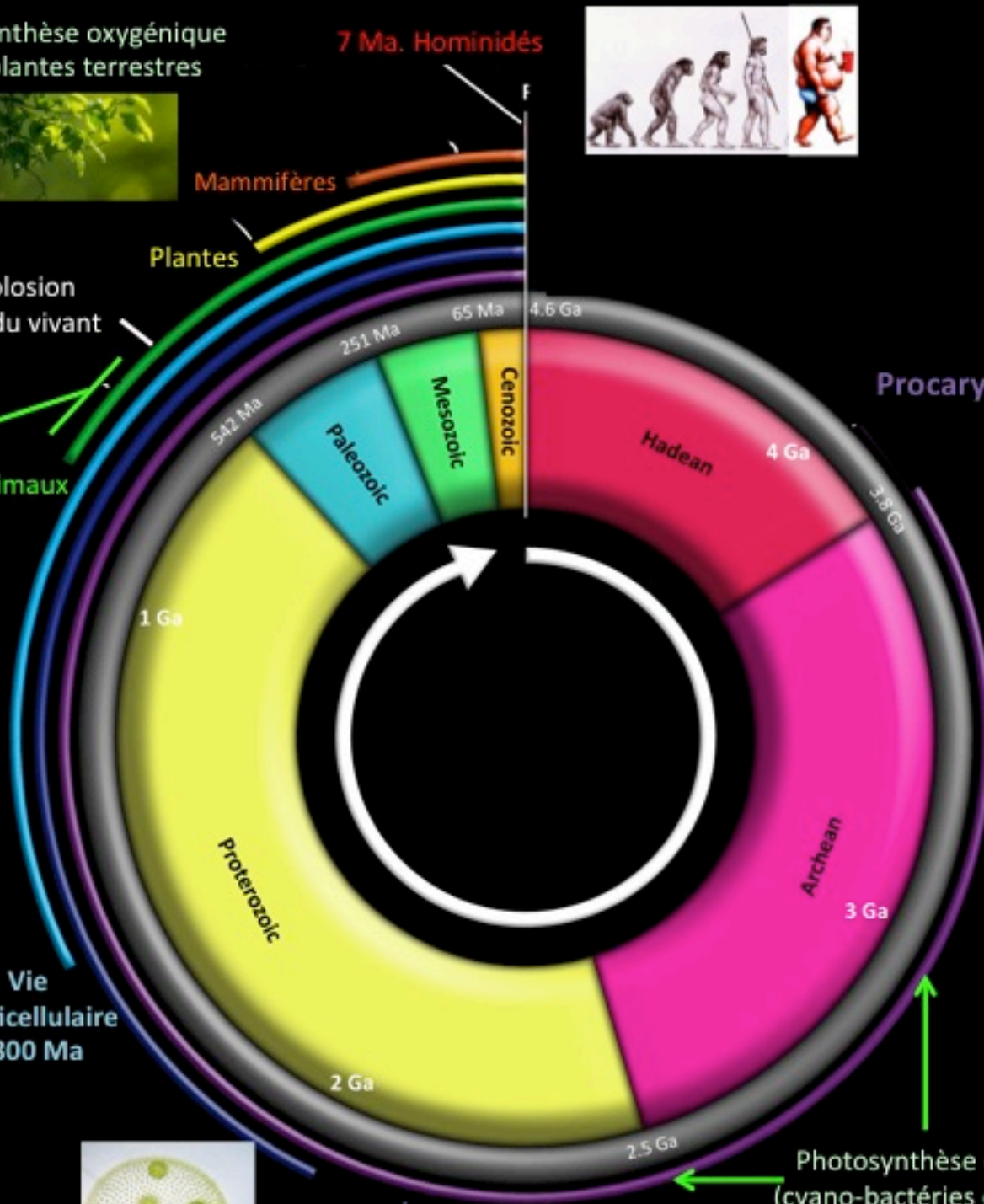
Eucaryotes  
1800 à 2000 Ma

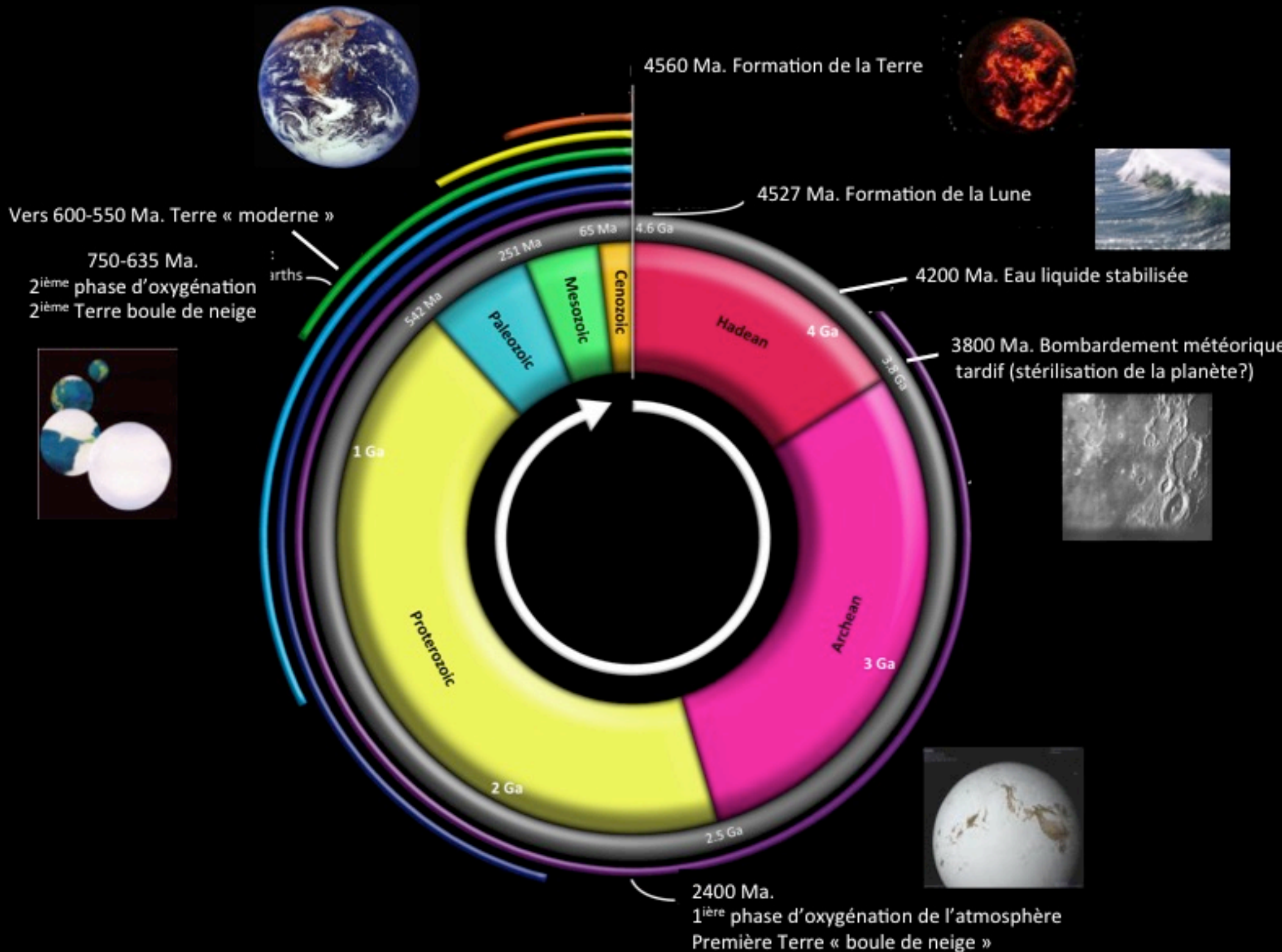


Procaryotes (Archées et Bactéries)  
3800 -3500 Ma



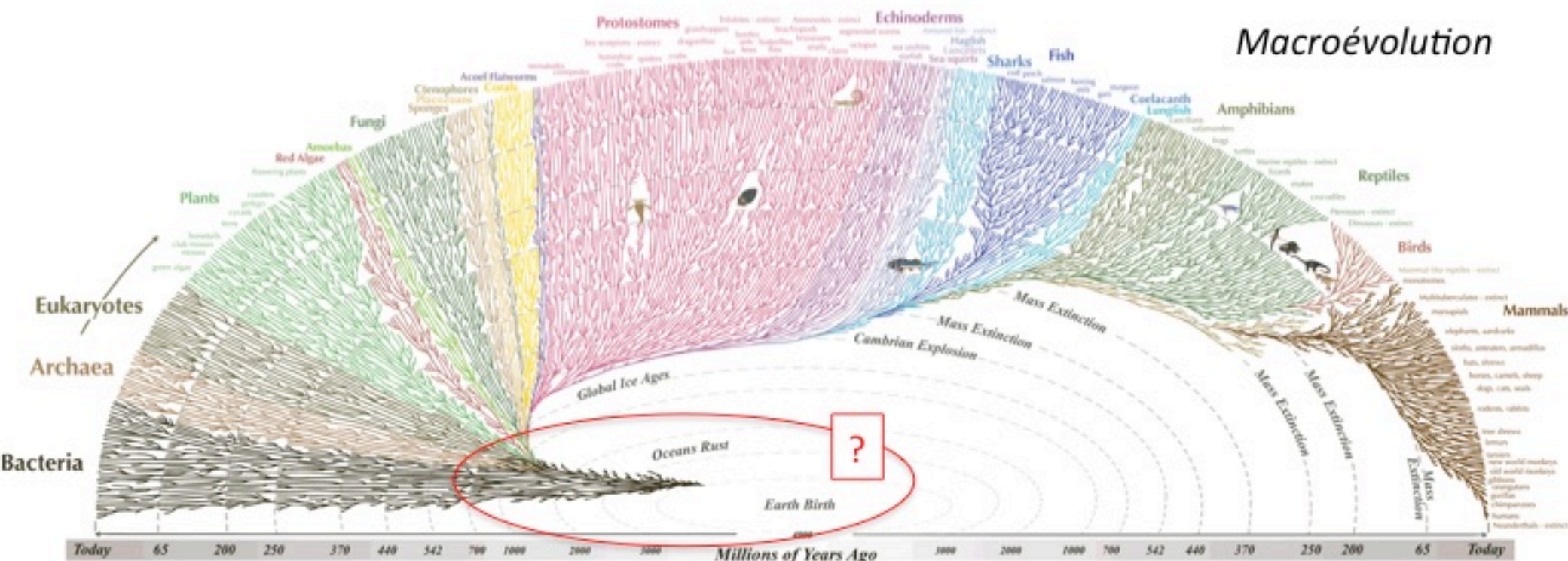
Photosynthèse oxygénique. 2500-3000Ma  
(cyano-bactéries qui produisent de l'oxygène)





Bactéries et Archées, autant diversifiés que les eucaryotes mais beaucoup moins bien répertoriés dans le registre fossile car laissent peu de traces.

Macroévolution



All the major and many of the minor living branches of life are shown on this diagram, but only a few of those that have gone extinct are shown. Example: Dinosaurs - extinct

© 2008 Leonard Horvath. All rights reserved. [evolution.illustration.com](http://evolution.illustration.com)

90% de l'histoire du vivant

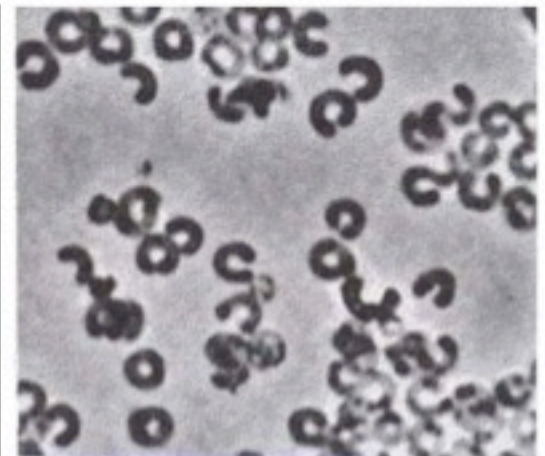
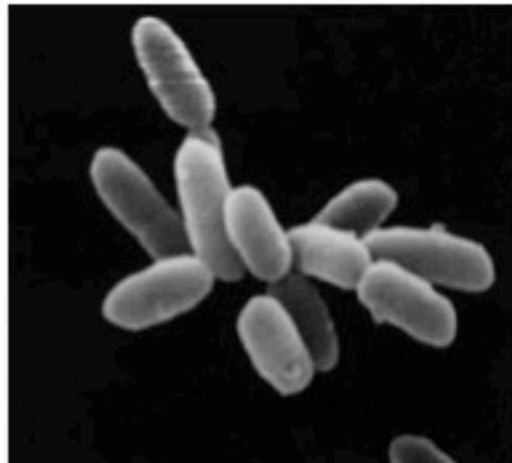
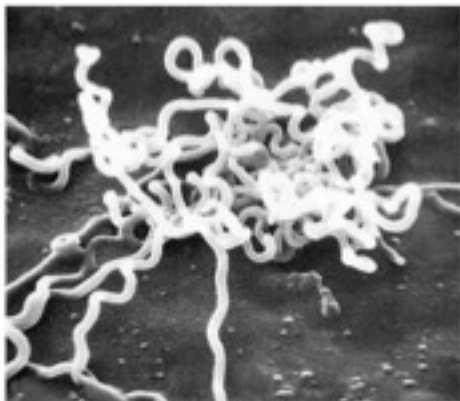
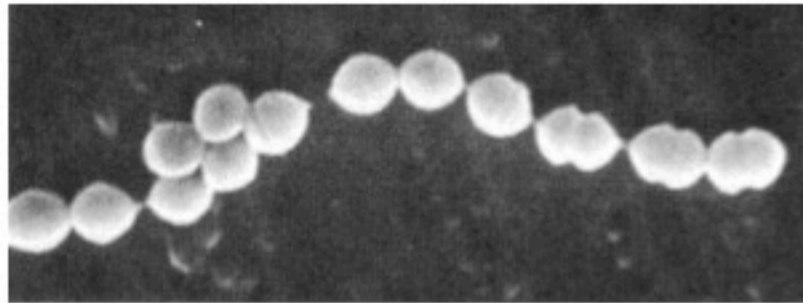
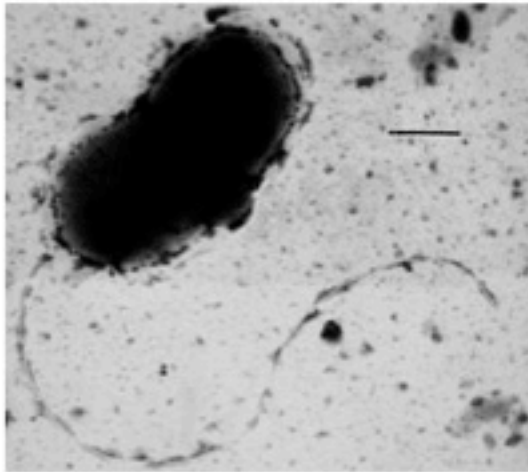


# Inconvénients des procaryotes (Archées et bactéries)

- Pas de signes distinctifs et très petits ( $\mu\text{m}$ )
- Pas de squelette ou coquille (difficile à préserver)
- Impossible d'extraire une information métabolique ou un lien de parenté à partir de la morphologie

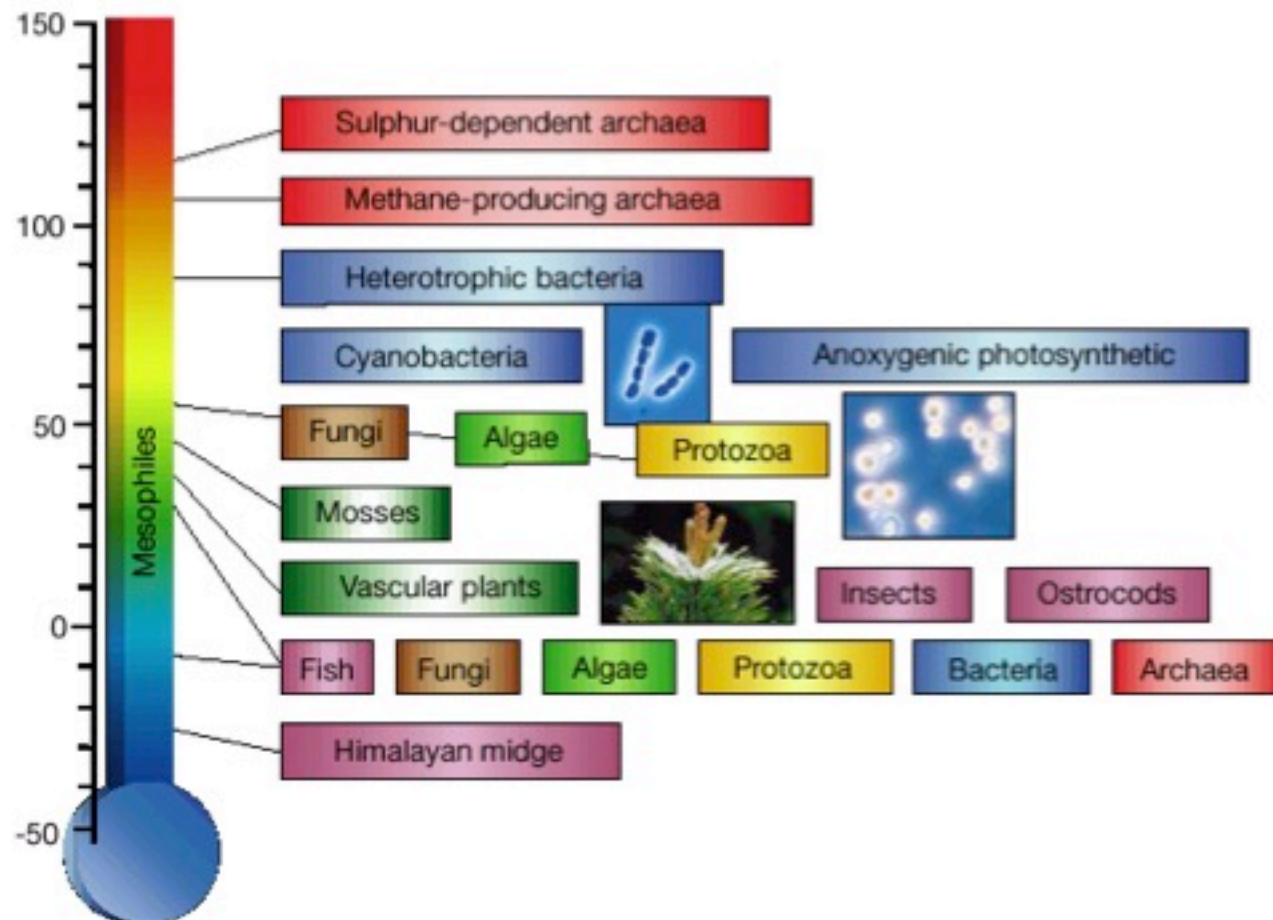
0,001 mm

1  $\mu\text{m}$



# Avantages des procaryotes

- Versatiles (peuvent respirer à peu près tout)  
→ O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, S, fer, Cu, Zn, Ni, Mo, arsenic...
- Adaptables à une grande gamme de température (-50 à + 133°C)  
de pression, de pH (1 à 12), de teneurs en sel, de rayons UV et rayons X...



# Avantages des procaryotes

- Ils sont tellement coriaces qu'ils sont toujours présents dans les environnements (parfois extrêmes) actuels.



*Lago Diamante, Argentine, 4900 m d'altitude*

- Un bon analogue de la Terre ancienne
- Très salé
- Fort rayonnement UV
- Riche en fer, soufre et arsenic
- Environnement volcanique actif

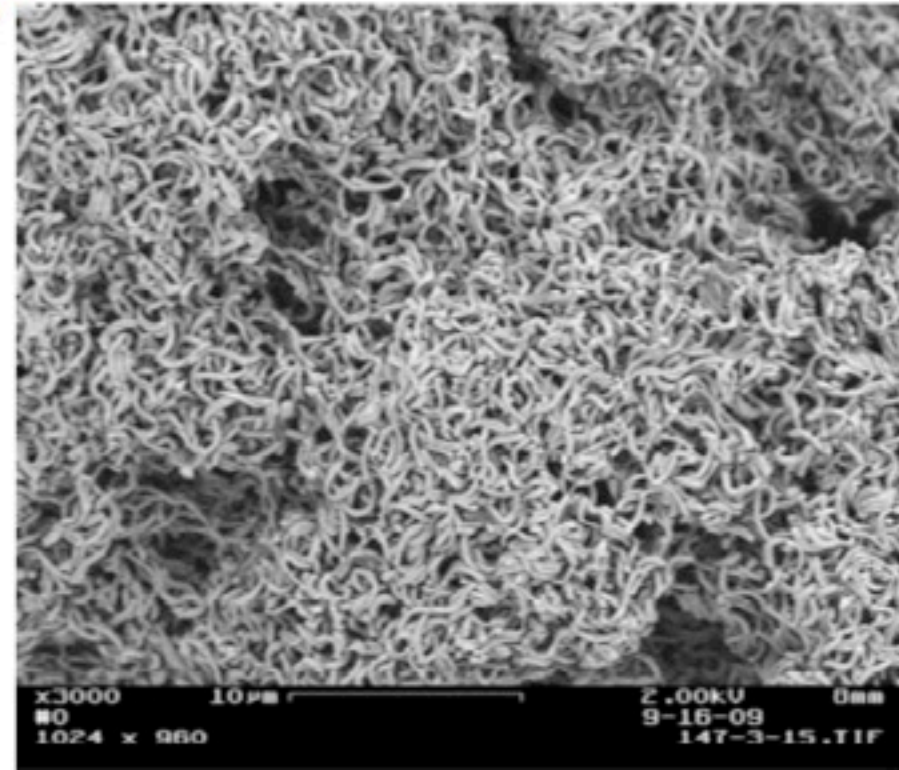
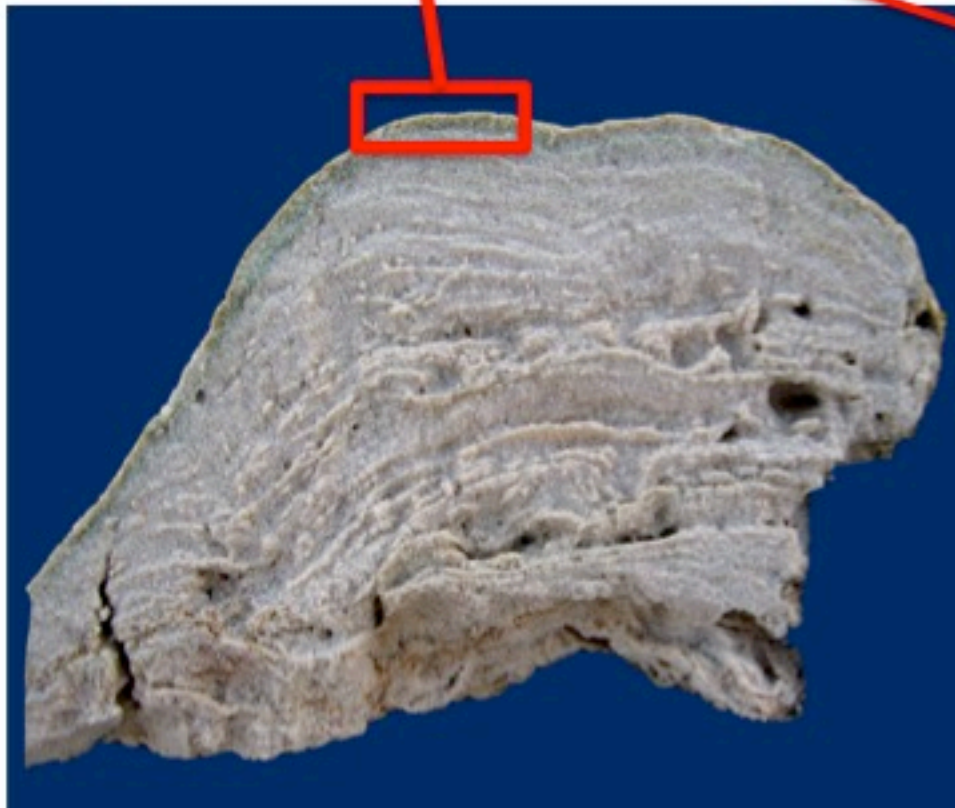


# Avantages des procaryotes

- ils vivent en communauté sous forme de tapis microbiens et construisent des structures appelées stromatolites



Bahamas



# Stromatolites utilisés depuis les années 70 comme marqueurs de la vie primitive sur Terre



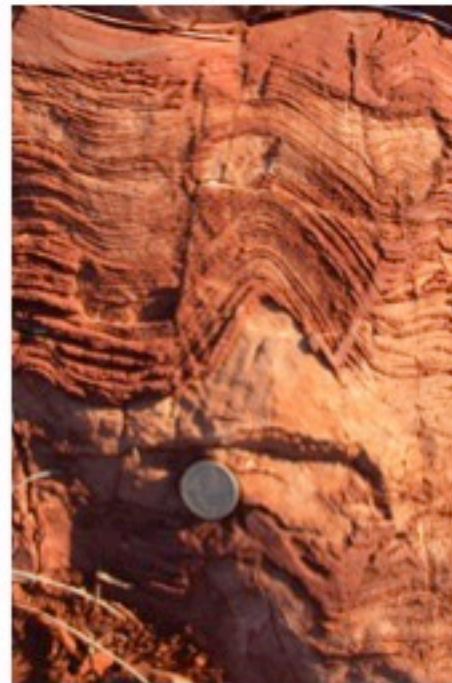
## Australie

- A, B. Tumbiana Fm., 2.74 Ga
- H, I, J, L. Strelley Pool Chert, 3.4 Ga
- M, N. Dresser Fm., 3.45 Ga

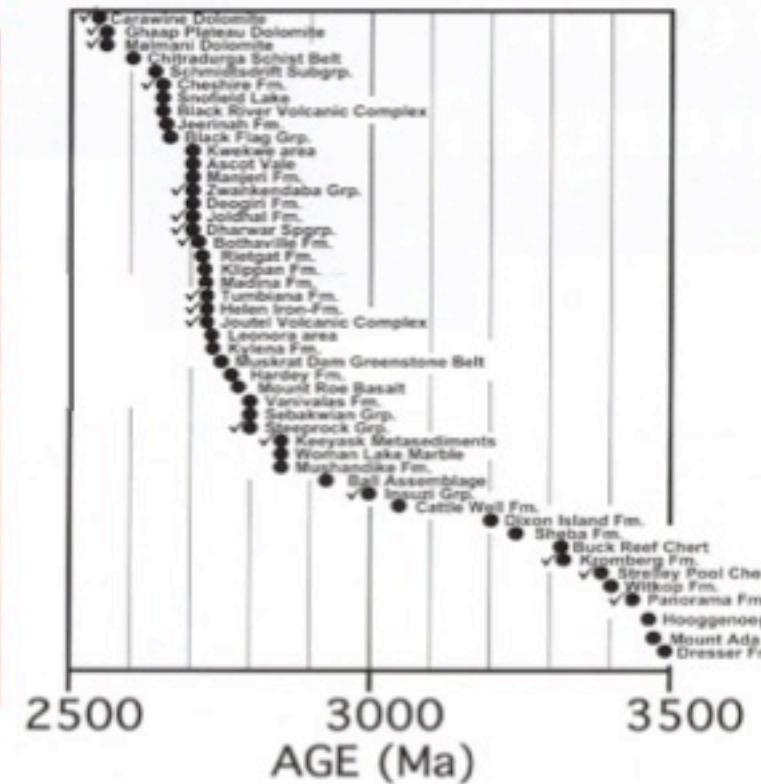
## Afrique du Sud

- C, D, E. Insuzi Gp, 2.95 Ga
- F. Fig Tree Gp, 3.245 Ga
- G. Kromberg Fm. 3.32 Ga

Strelley pool chert  
Australie, 3,45 Ga



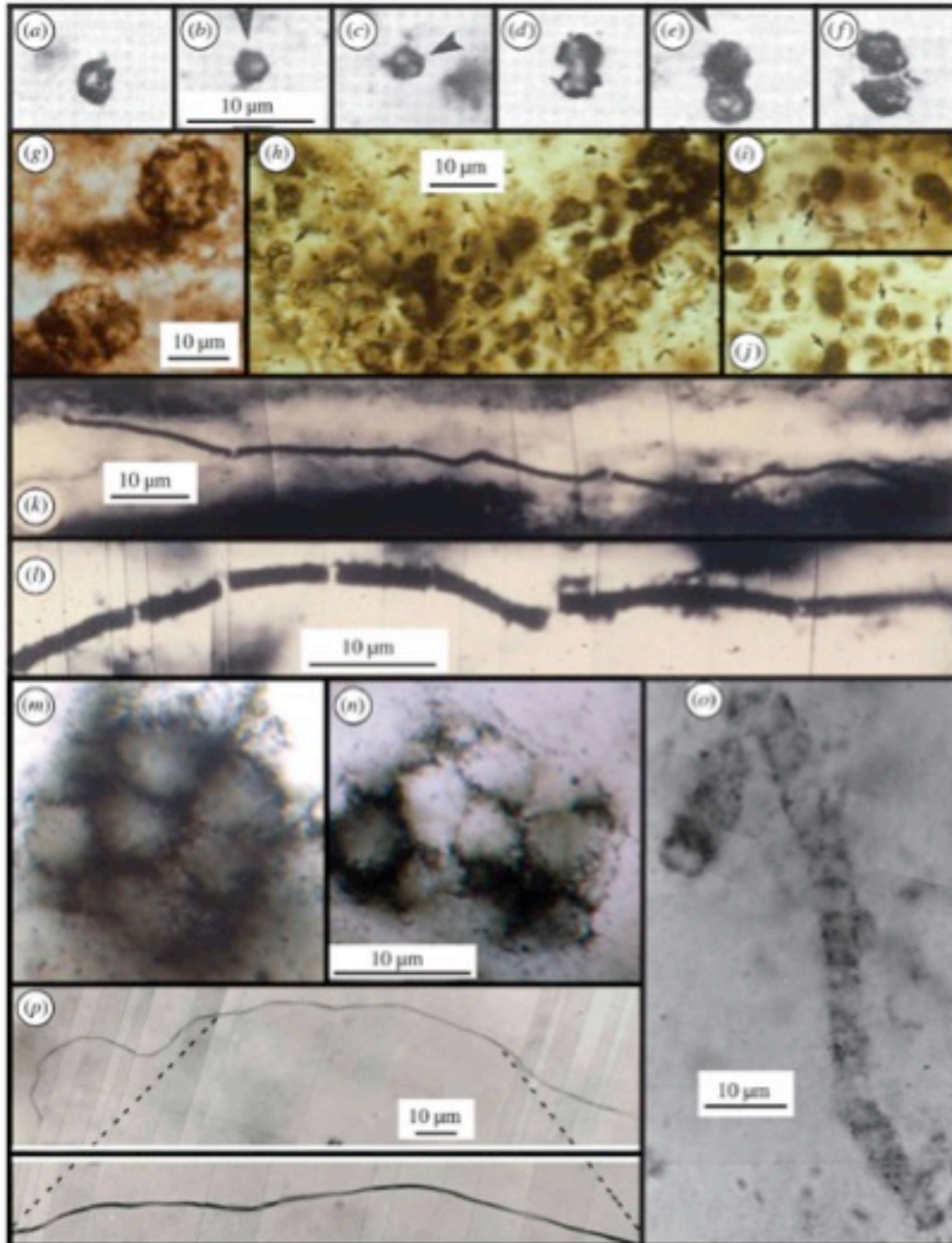
Stromatolites archéens



Stromatolites actuels



# Témoins de « microfossiles » supposés utilisés depuis les années 70 comme marqueurs de la vie primitive durant l'Archéen



## Afrique du Sud

A-F. Swartkoppie Fm., 3.36 Ga

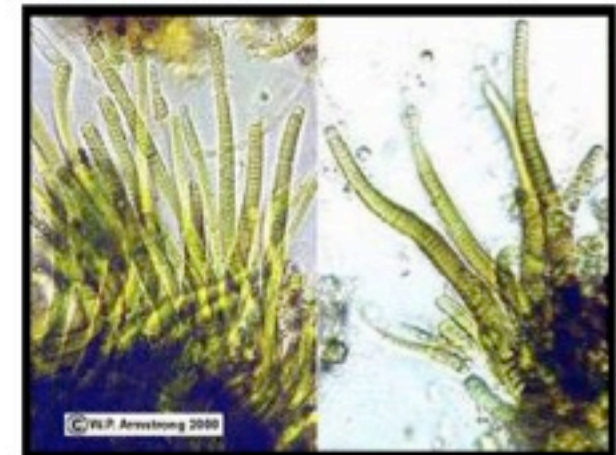
G. Sheba Fm., 3.24 Ga

H-L. Kromberg Fm., 3.32 Ga

## Australie

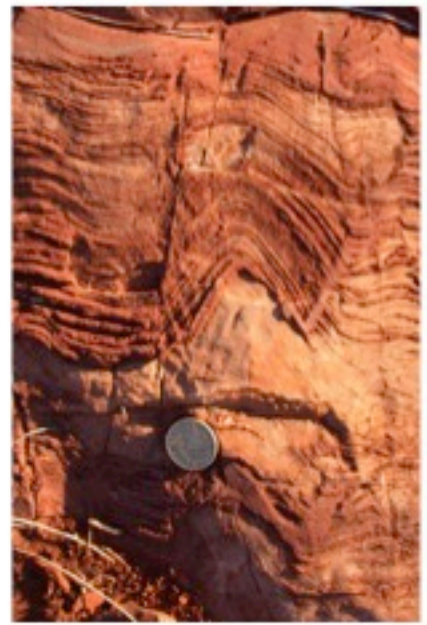
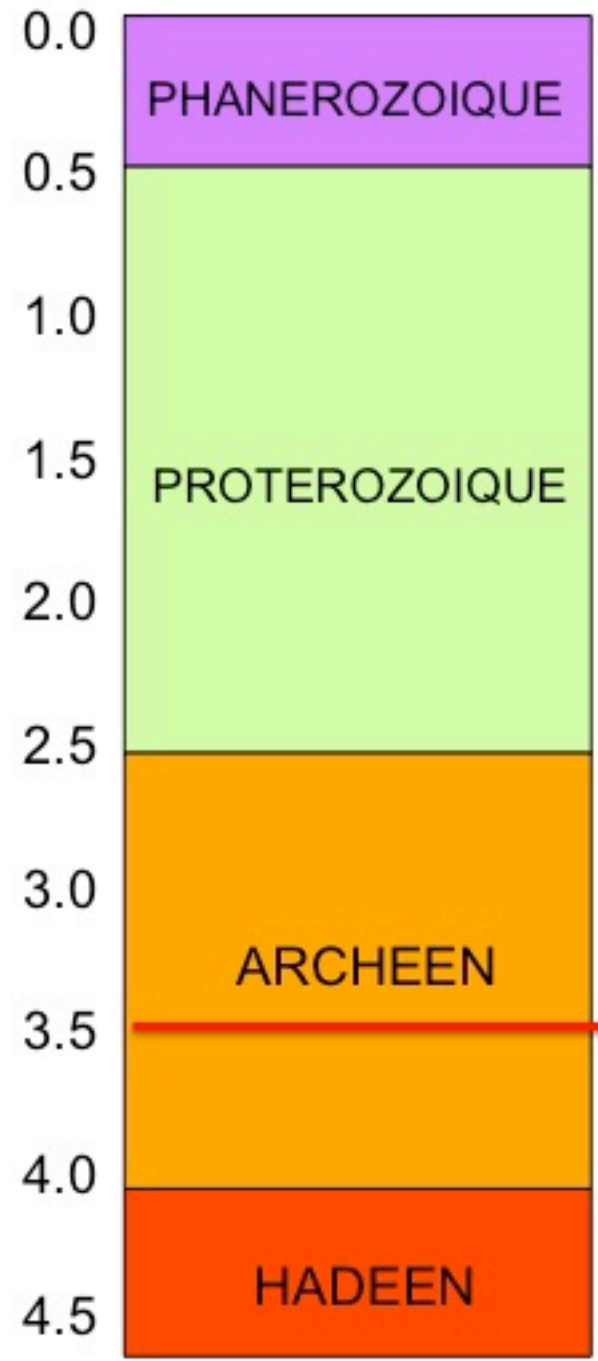
M, N. Strelley Pool Chert, 3.24 Ga

O, P. Mount Ada Basalt, 3.7 Ga

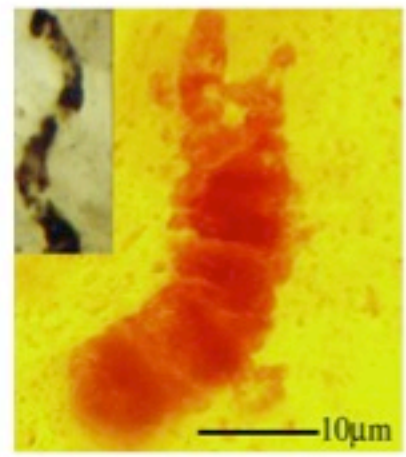


Cyanobactéries modernes

# Les plus anciens témoins non discutés car bien préservés sont à 3500 Ma



*Stromatolites - Strelley Pool, 3,5 Ga, Australie*



*Microfossiles - Apex Formation, 3,45 Ga, Australie*

Les découvertes les plus récentes sont dans des roches du Groenland et du Canada du fait du retrait des glaces arctiques

## LETTER

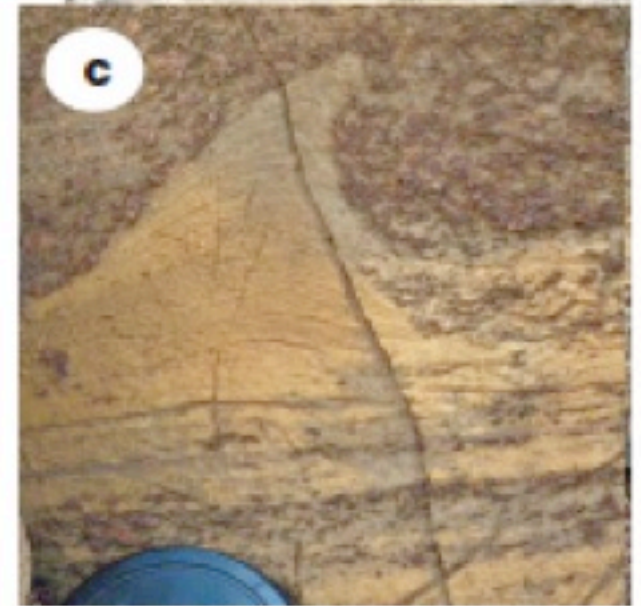
2016

doi:10.1038/nature19355

### Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures

Allen P. Nutman<sup>1,2</sup>, Vickie C. Bennett<sup>3</sup>, Clark R. L. Friend<sup>4</sup>, Martin J. Van Kranendonk<sup>2,5,6</sup> & Allan R. Chivas<sup>1</sup>

Isua, Greenland 3.7 Ga, plus vieux stromatolites?



## ARTICLE

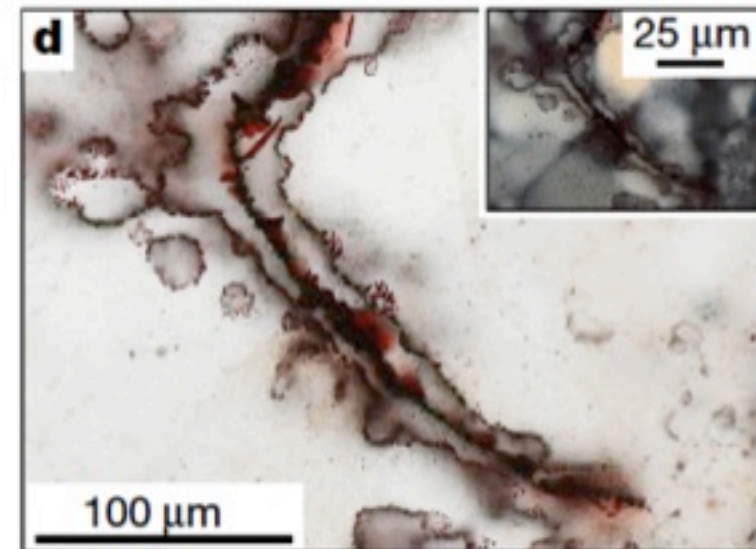
2017

doi:10.1038/nature21377

### Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates

Matthew S. Dodd<sup>1,2</sup>, Dominic Papineau<sup>1,2</sup>, Tor Grenne<sup>3</sup>, John F. Slack<sup>4</sup>, Martin Rittner<sup>2</sup>, Franco Pirajno<sup>5</sup>, Jonathan O'Neil<sup>6</sup> & Crispin T. S. Little<sup>7</sup>

Nuvvuagittuq, Canada 3.8 Ga, plus vieux microfossiles?

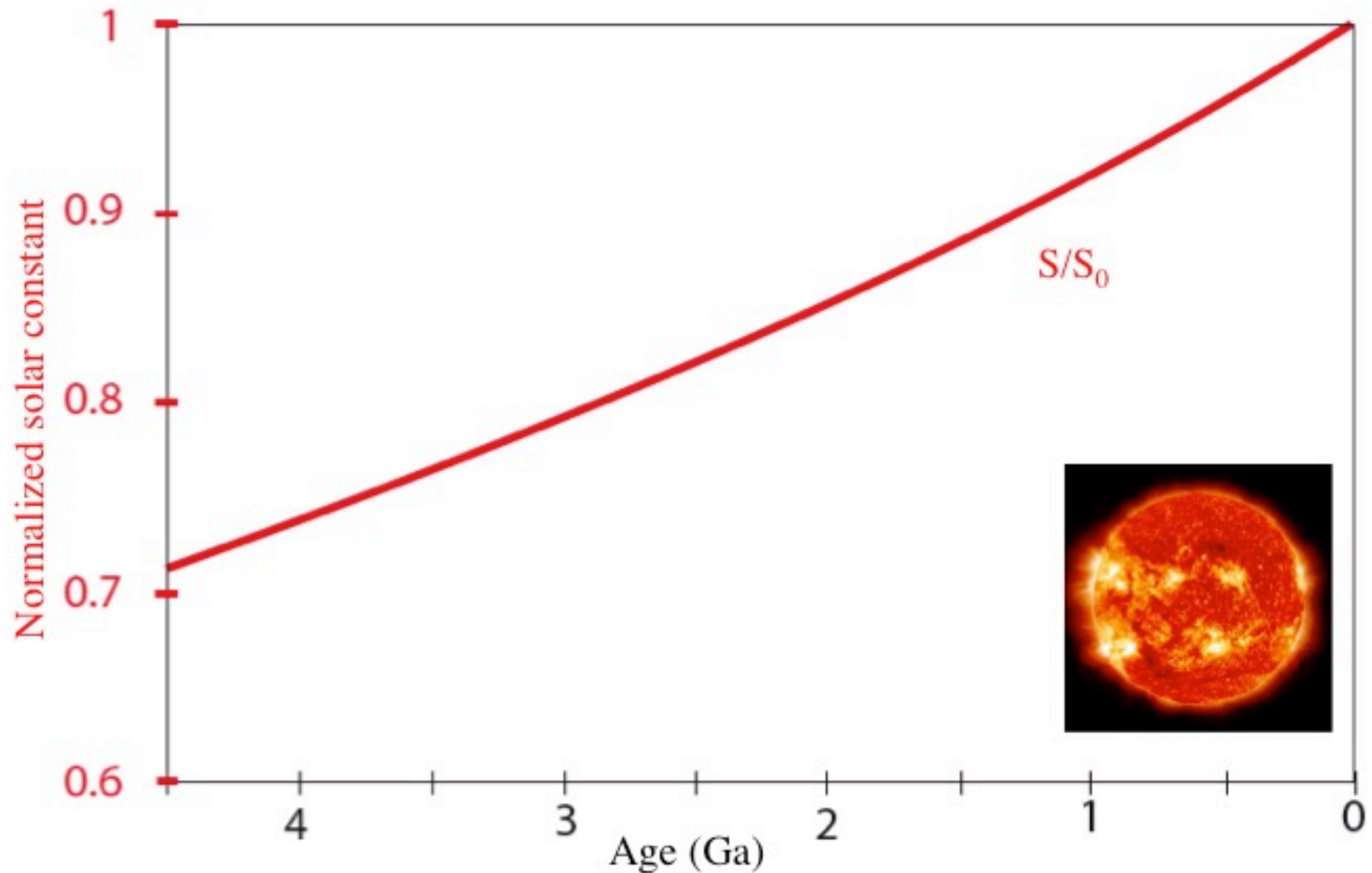




Lien entre vie et atmosphère primitives

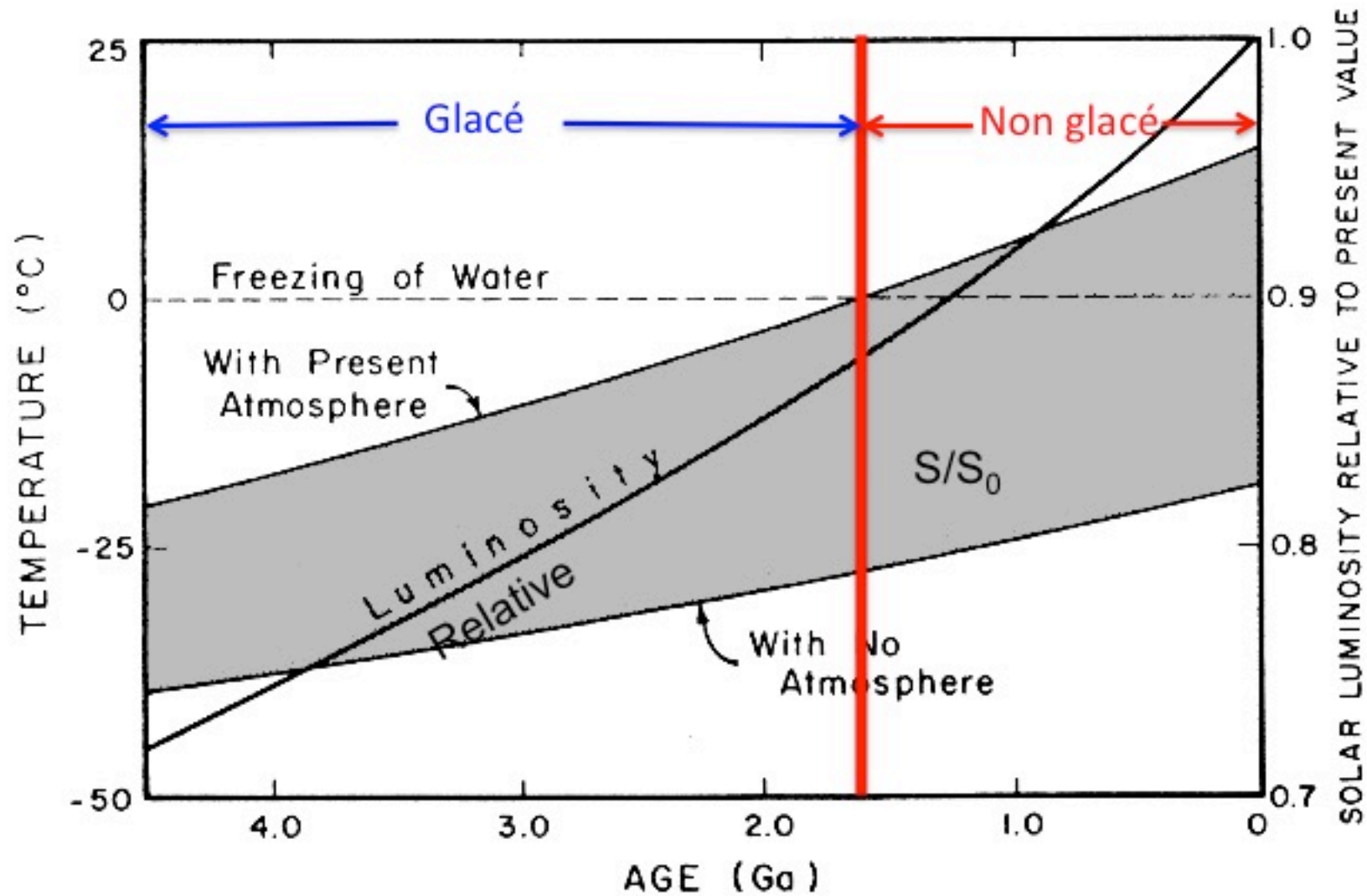
# Le paradoxe du Soleil Jeune (PSJ)

Evolution de la constante solaire (*Sagan and Mullen, 1972*)

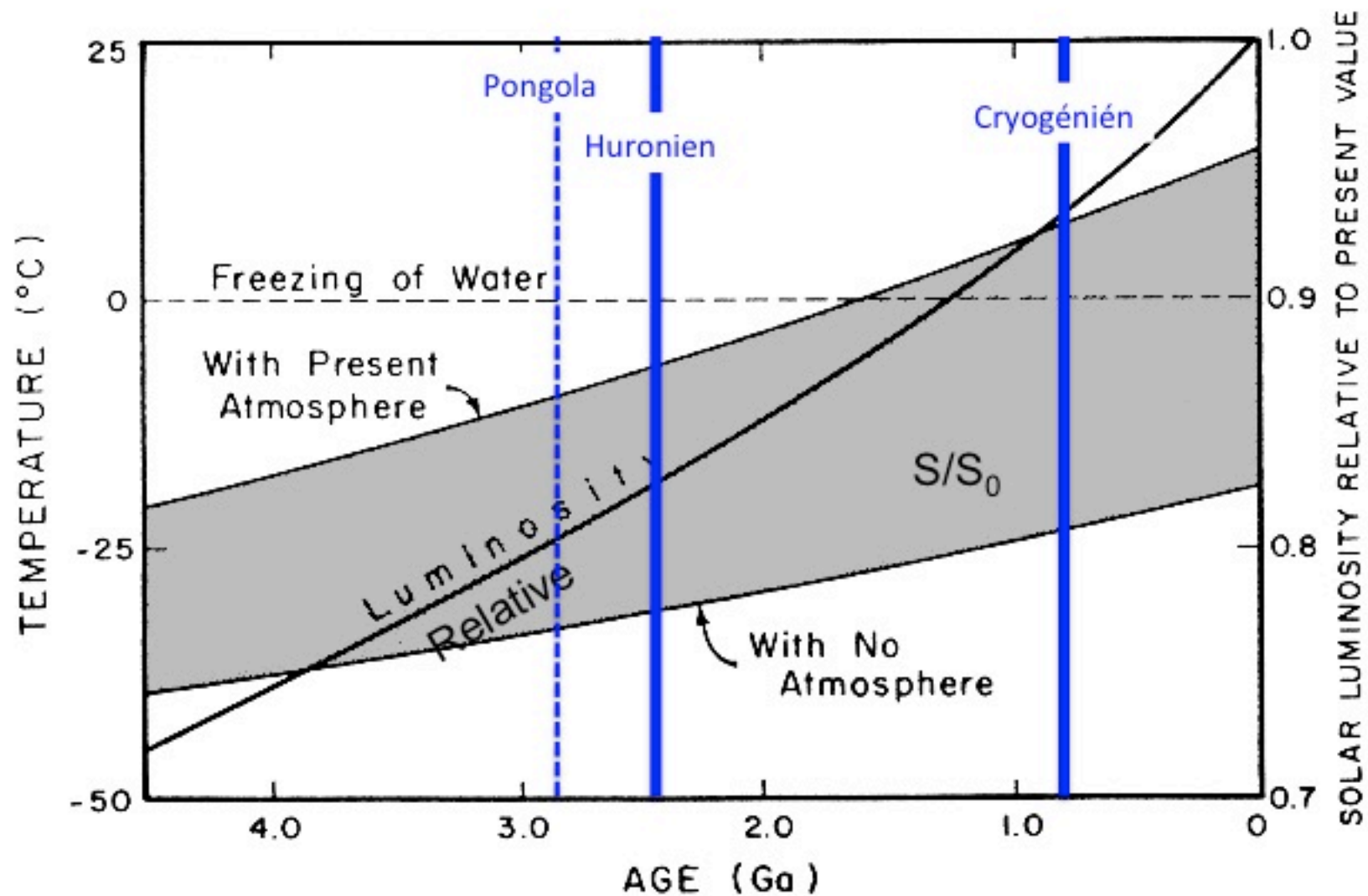


# Climat Précambrien: le paradoxe du Soleil jeune

Température moyenne à la surface de la Terre, modèle 1D (Kasting et al, 1988)



## Climat Précambrien: le paradoxe du Soleil jeune



Pas de glaciation connue avant 2.9 Ga et première glaciation globale est datée à ~2.4 Ga

# Solutions possibles pour expliquer que la Terre ne soit pas englacée avant ~ 2 Ga?

- Albedo différente?

Implique de réduire les quantités de nuages. Difficile sur une terre chaude

- Chaleur géothermique?

Trop faible  $0.06 \text{ W/m}^2$  vs  $\sim 240 \text{ W/m}^2$  issue de la lumière du soleil

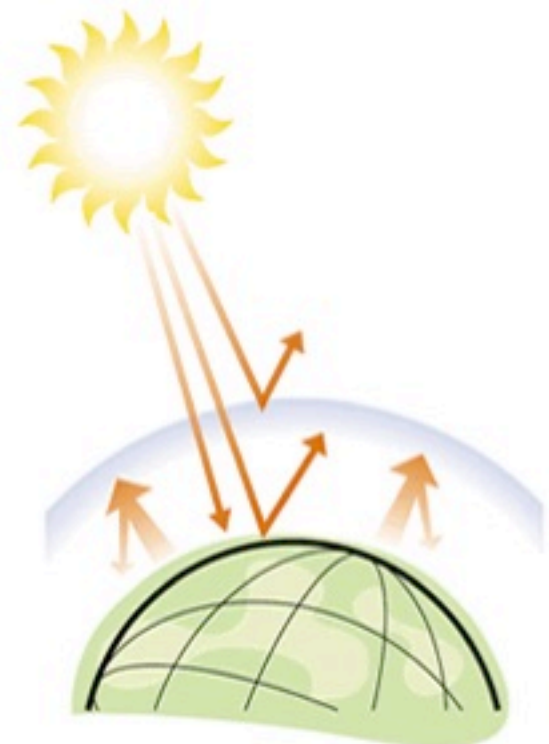
- Effet de Serre le plus probable

Gaz à effet de serre possibles en + de  $\text{H}_2\text{O}$

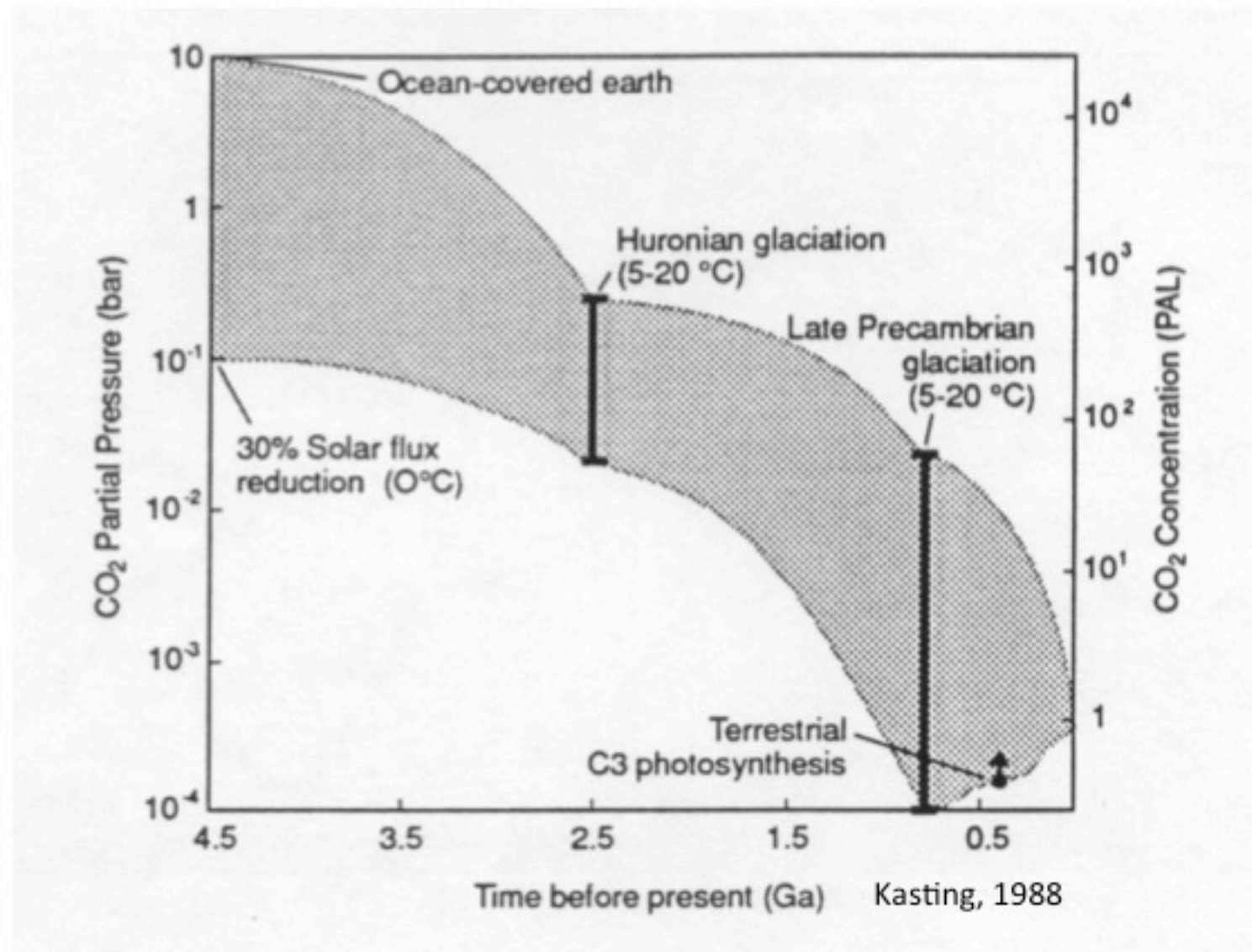
$\text{NH}_3$ : photolyse rapidement

$\text{CO}_2$ : OK, provient des volcans

$\text{CH}_4$ : OK, mais nécessite la vie si grande quantité

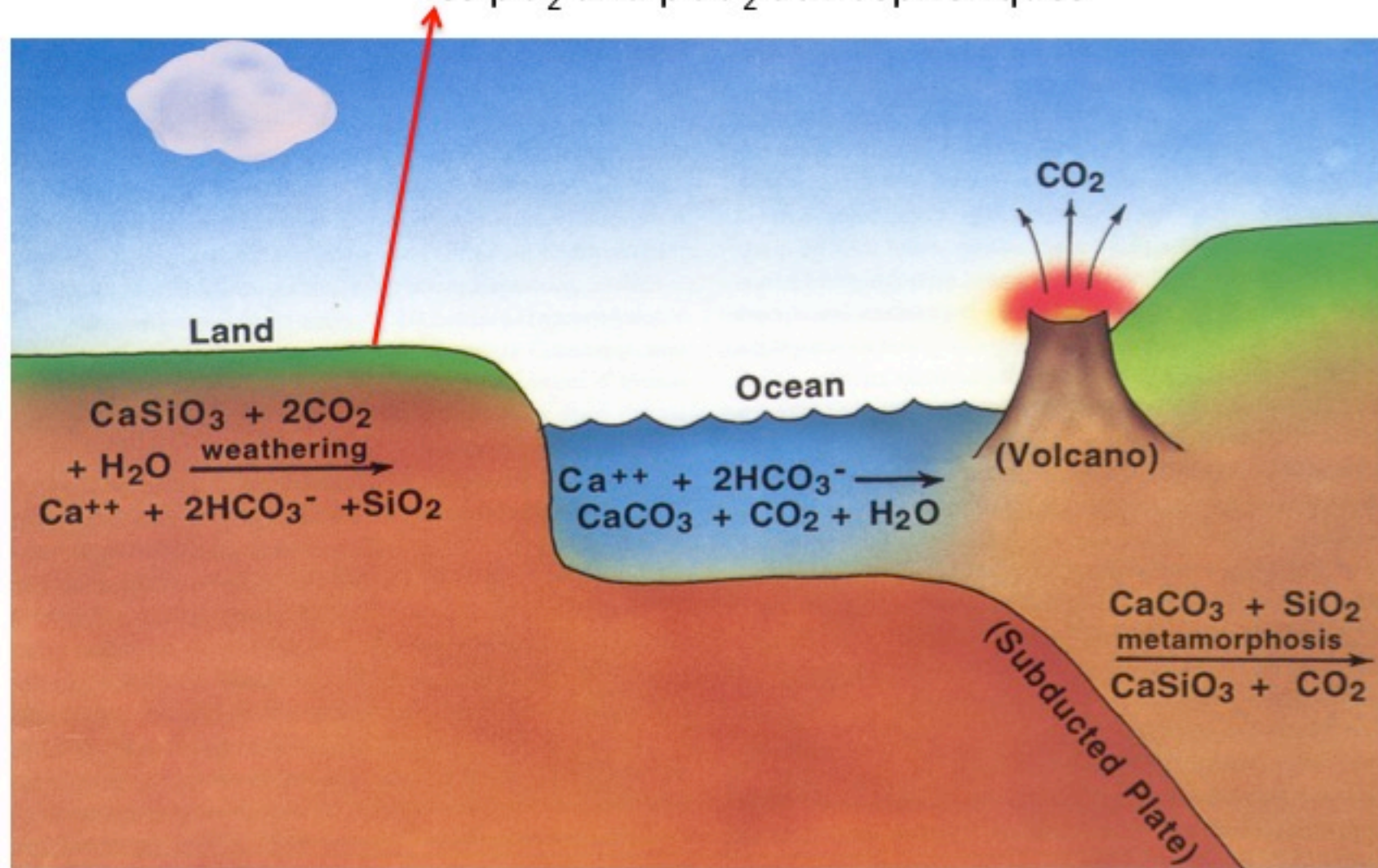


# CO<sub>2</sub> atmosphérique calculé à partir d'un modèle 1D



*1000 à 10000 fois + de CO<sub>2</sub> à l'Archéen*

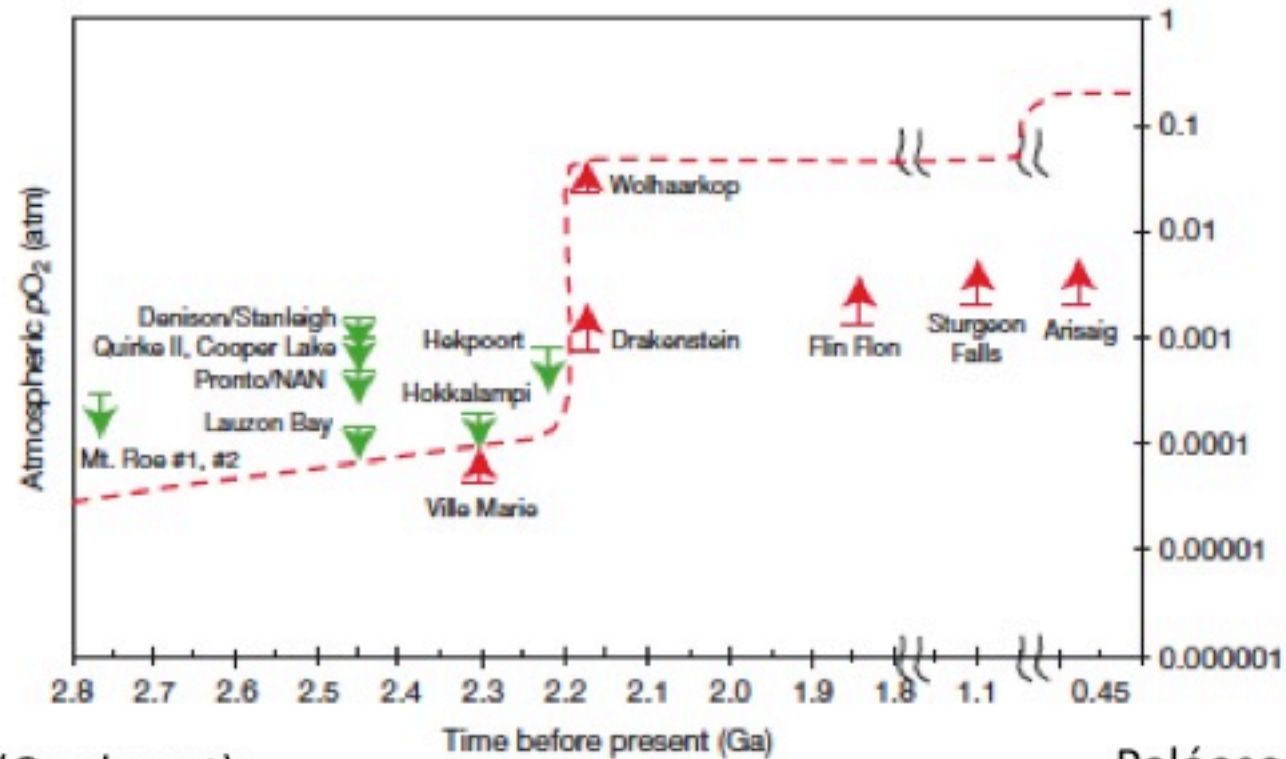
Surface des continents sont les plus adaptées pour évaluer les  $pO_2$  and  $pCO_2$  atmosphériques



Paléosols (sols fossiles) → une fenêtre sur la paléo-atmosphère

# Paléosols utilisés pour contraindre les teneurs en CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dès les années 80

Holland, 1998



Paléosols archéens (O<sub>2</sub> absent)



Paléosols modernes



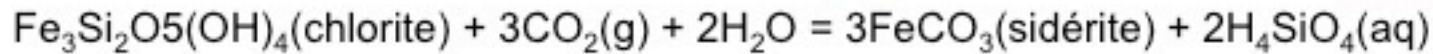


# Paléosols de Mount Roe



- **Modèle thermochimique**

absence de Fe-carbonates →  $p\text{CO}_2 < 100 \text{ PAL}$



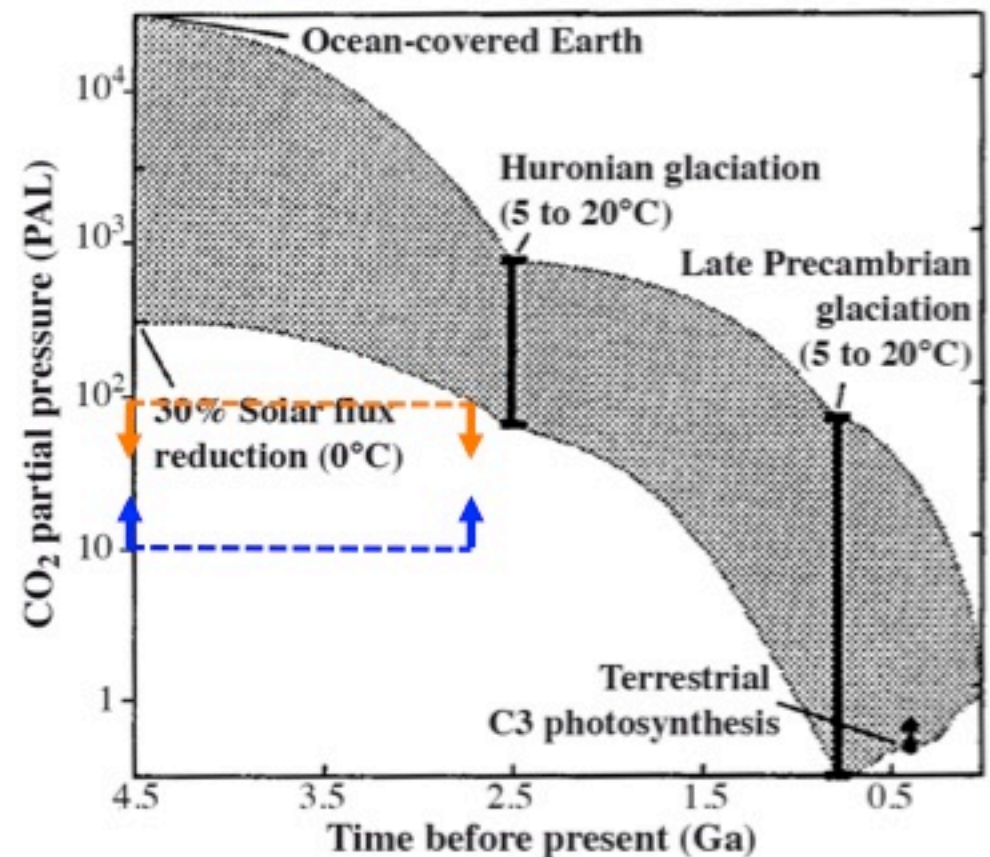
- **Modèle équilibre des masses**

Indépendant des conditions redox,  $10 \text{ PAL} < p\text{CO}_2 < 90 \text{ PAL}$

Un gaz à effet de serre autre que  $\text{CO}_2$  est nécessaire pour expliquer le PSJ

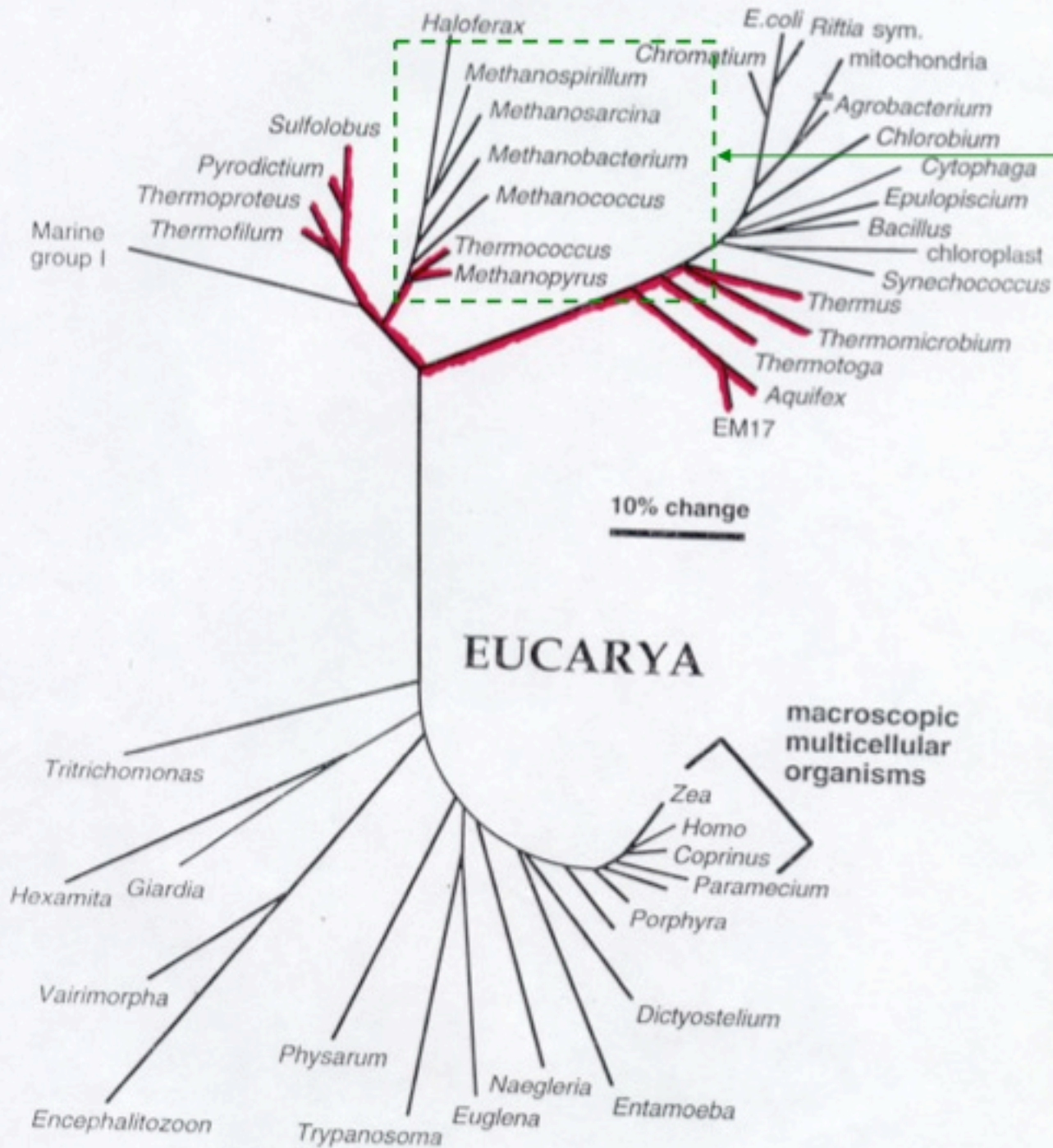
$\text{CH}_4$  qui peut avoir un temps de résidence long dans une atmosphère anoxique → 1000 ppmv

Mais cela implique la présence de méthanogènes



# ARCHAEA

# BACTERIA

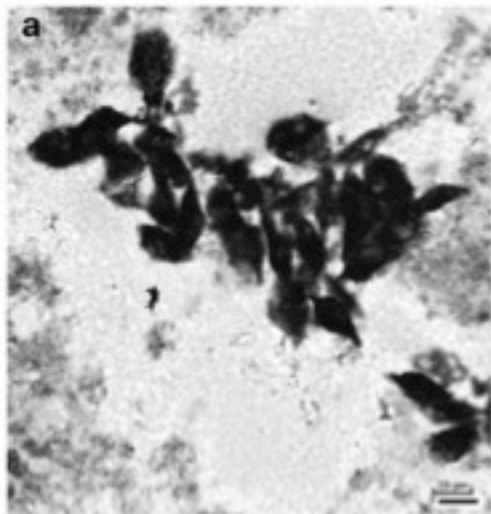
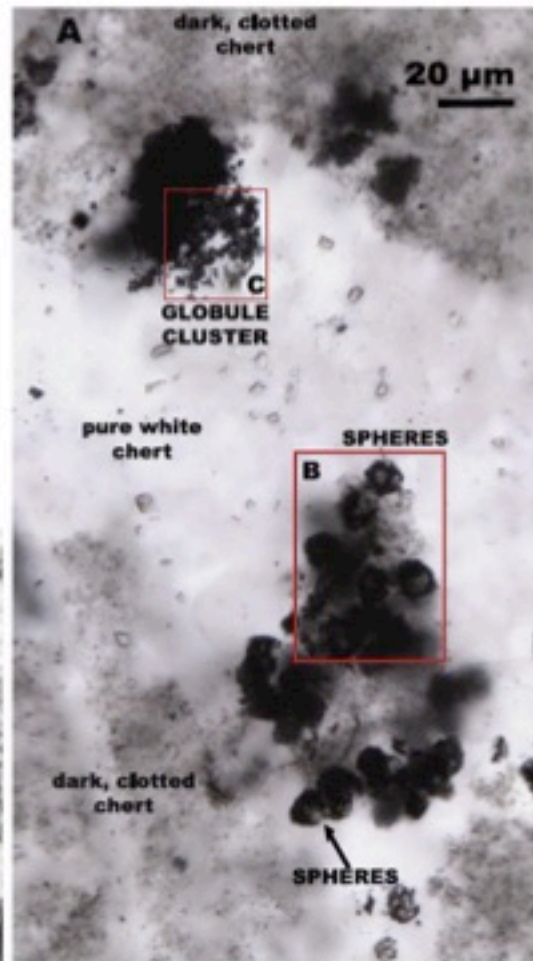
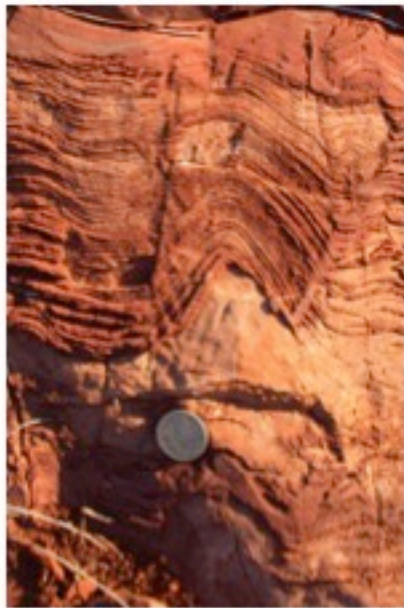
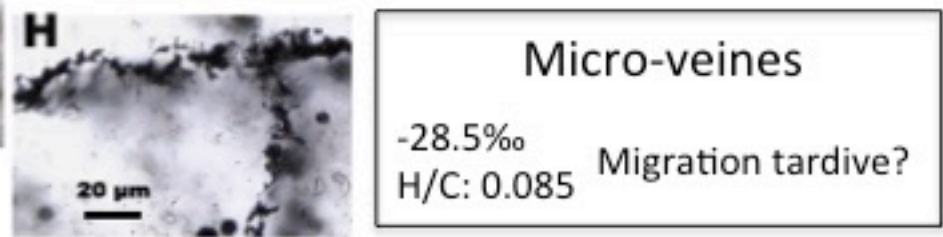
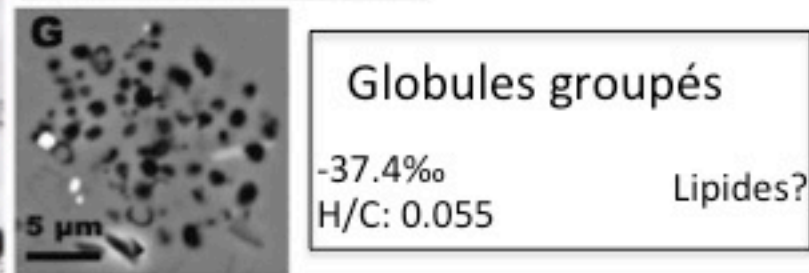
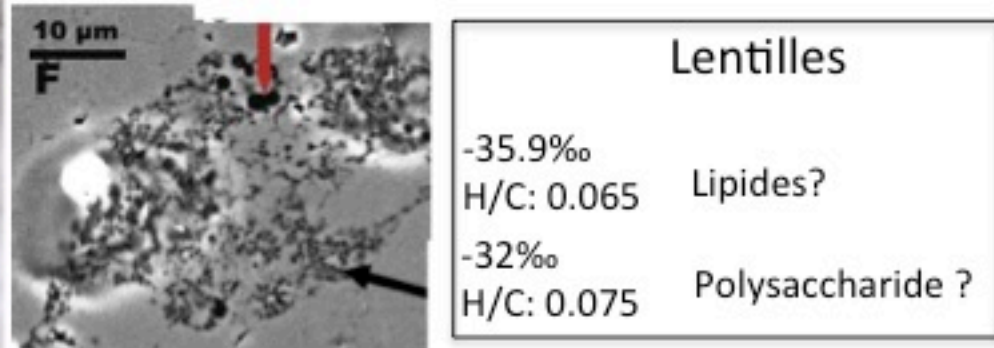
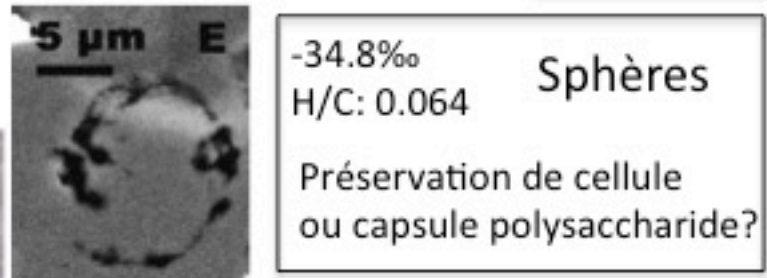
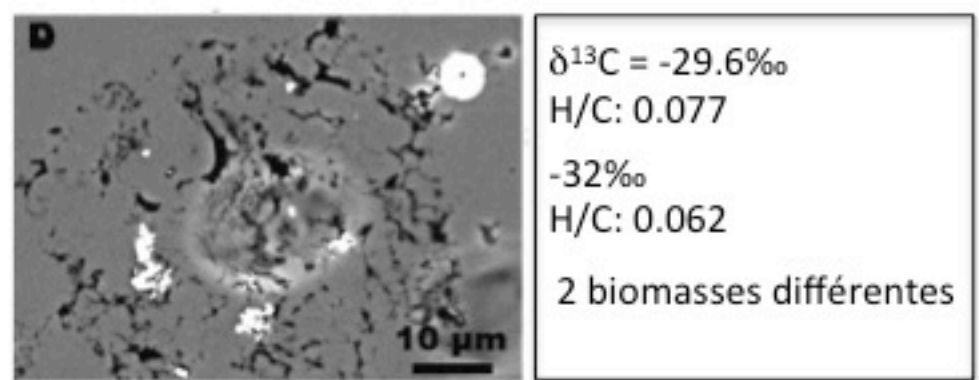


Bactéries/Archées  
méthanogènes proches  
de LUCA

(Hyper)thermophiles

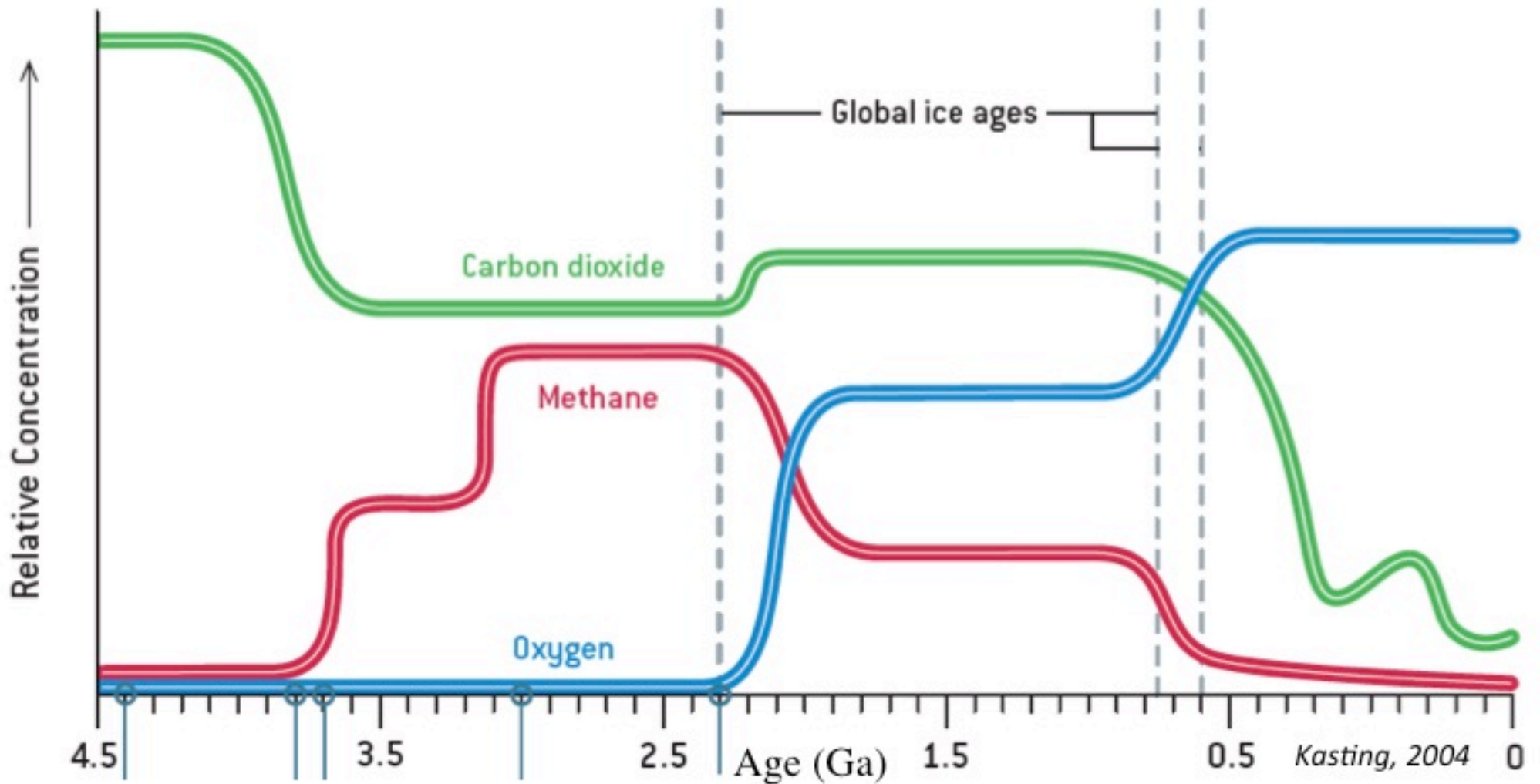
# Chert de Strelley Pool, 3.45 Ga

Biomasse de méthanogènes, méthanotrophes, organismes utilisant le soufre et photo-autotrophes possibles



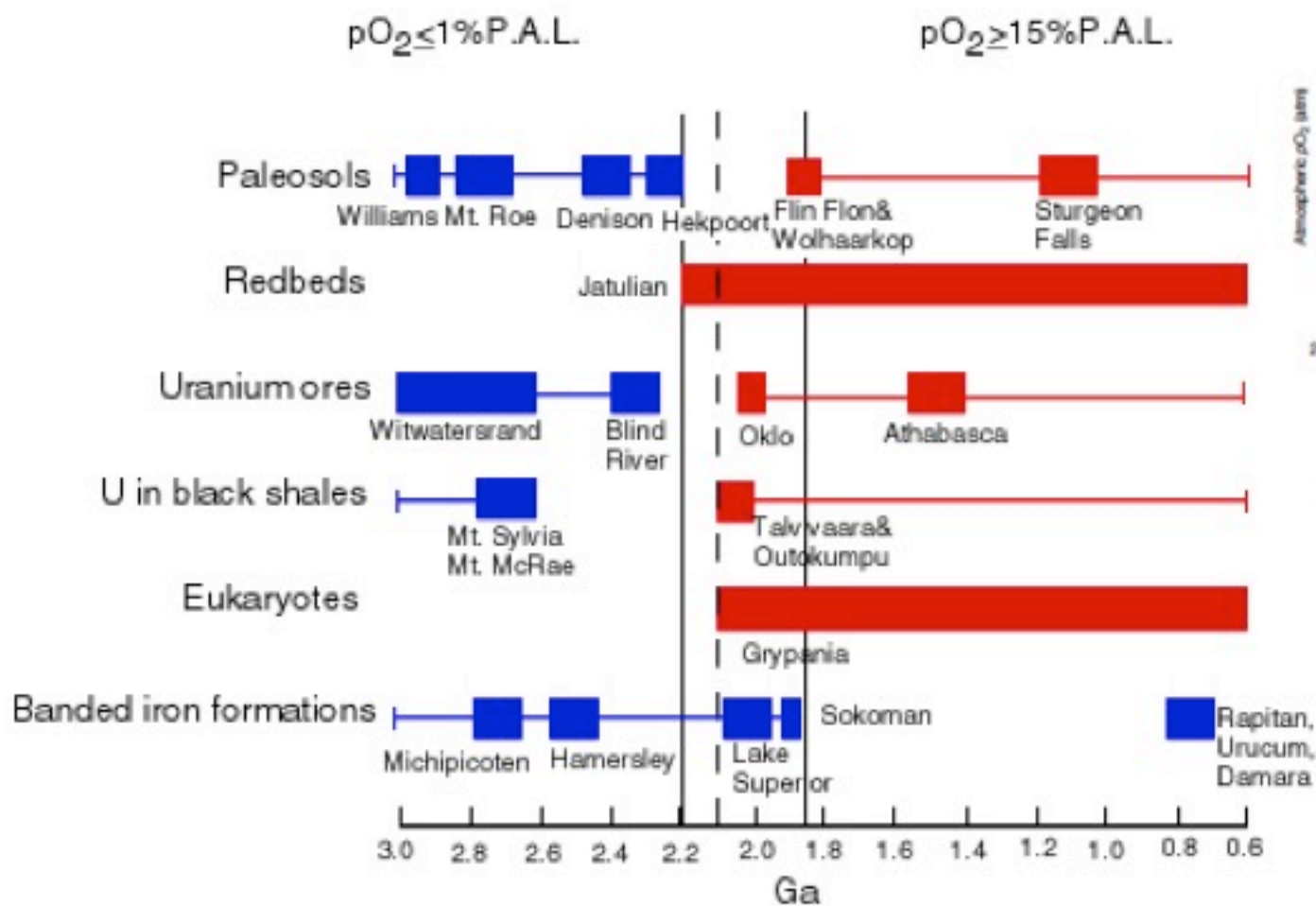
Lepot et al., 2013

# Modèle atmosphérique des concentrations $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ and $\text{O}_2$ au cours du temps

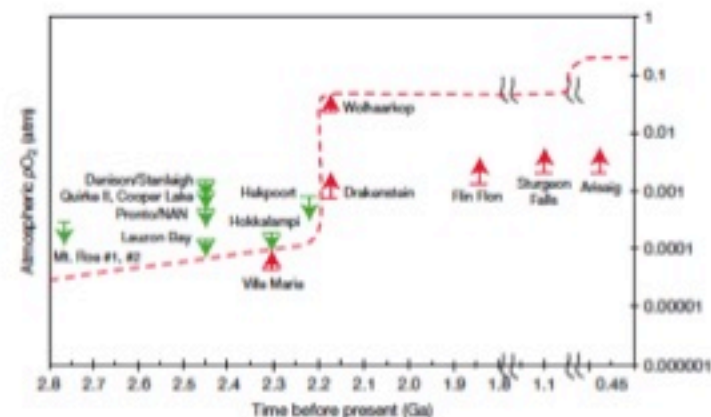


Teneurs en oxygène de l'atmosphère

# Indicateurs géologiques de l'apparition d'O<sub>2</sub> atmosphérique au Paléoprotérozoïque



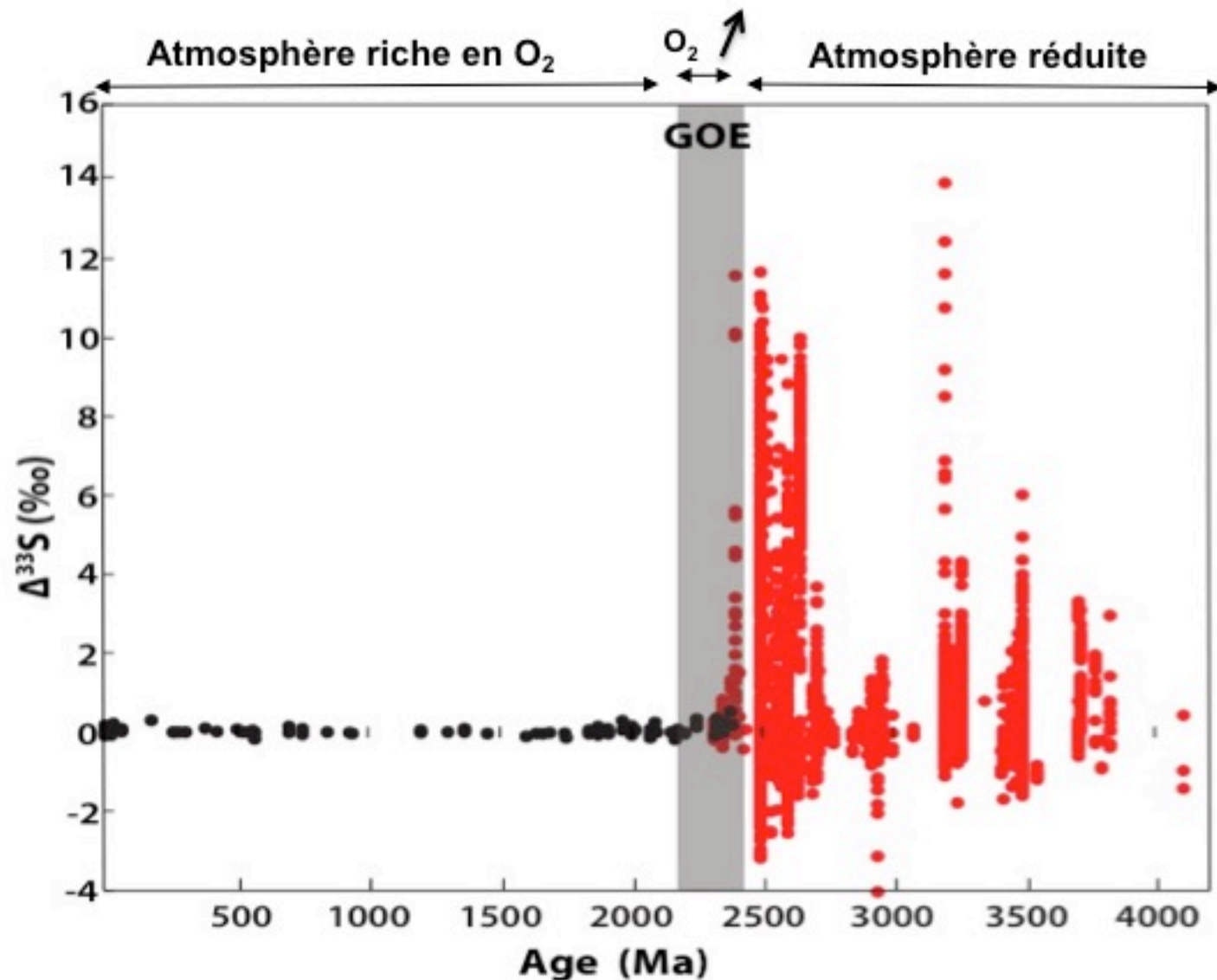
Holland et al., 1980



Paléosols ont permis de définir la courbe en escalier dès les années 80

Le meilleur outil pour contraindre les teneurs en  $O_2$   
atmosphérique au cours du temps sont les  
isotopes du soufre

Les pyrites des sédiments montrent des anomalies isotopiques en soufre "*fractionnement indépendant de la masse,  $\Delta^{33}\text{S}$* " qui démontrent l'absence d' $\text{O}_2$  avant 2.45 Ga et de faible teneur entre 2.45 et 2.2 Ga





# L'oxygénation de l'atmosphère de la Terre



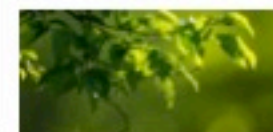
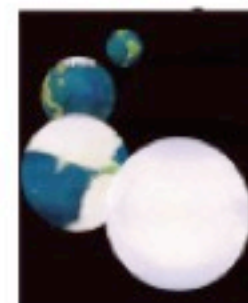
Photosynthèse oxygénique commence vers 3000 Ma. Il faut 500 Ma pour que cet O<sub>2</sub> soit exprimé dans l'atmosphère car très fortes teneurs en gaz réducteurs

O<sub>2</sub>

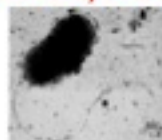
Eucaryotes

O<sub>2</sub>

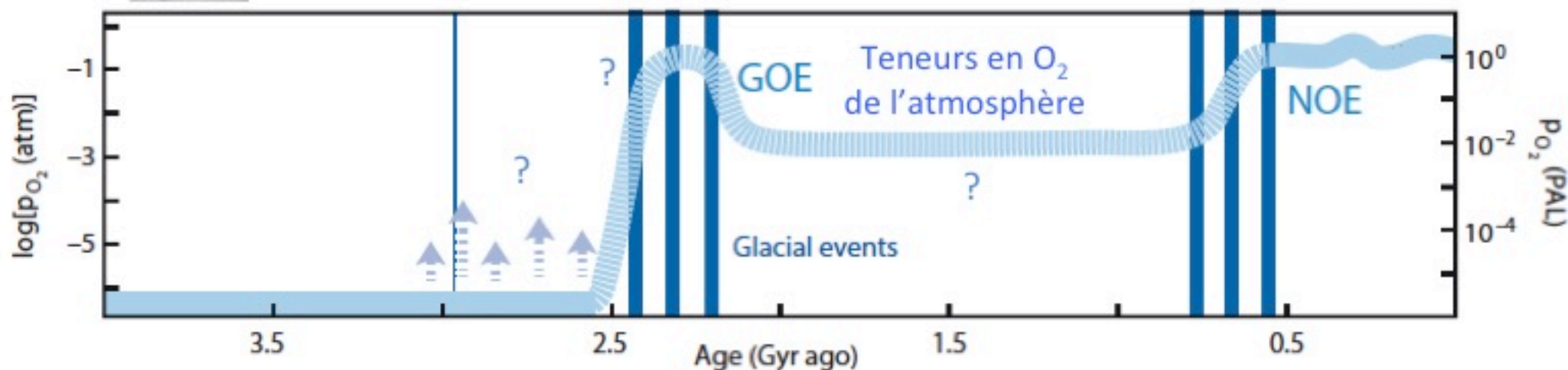
Explosion cambrienne



Bactéries, Archées



Photosynthèse oxygénique



GOE = La Grande Oxydation  
NOE = Oxydation Néoprotérozoïque

*Deux pics majeurs de production d'oxygène.  
A chaque fois cela a stimulé le vivant  
(apparition des eucaryotes après 2 Ga et  
des organismes à carapaces/squelettes vers 540 Ma)*

Merci Marianne pour l'invitation  
et joyeux anniversaire!