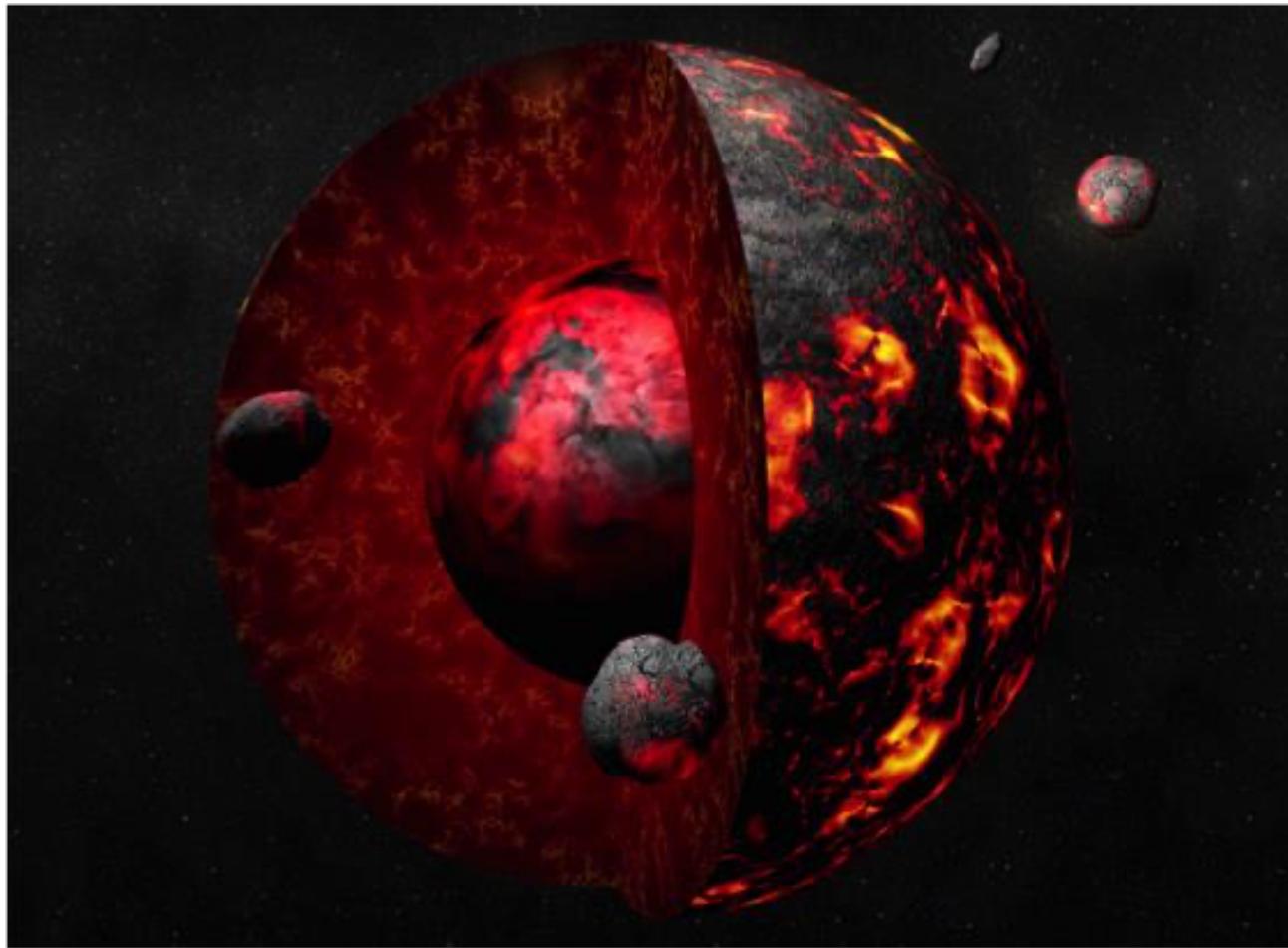


Le Précambrien

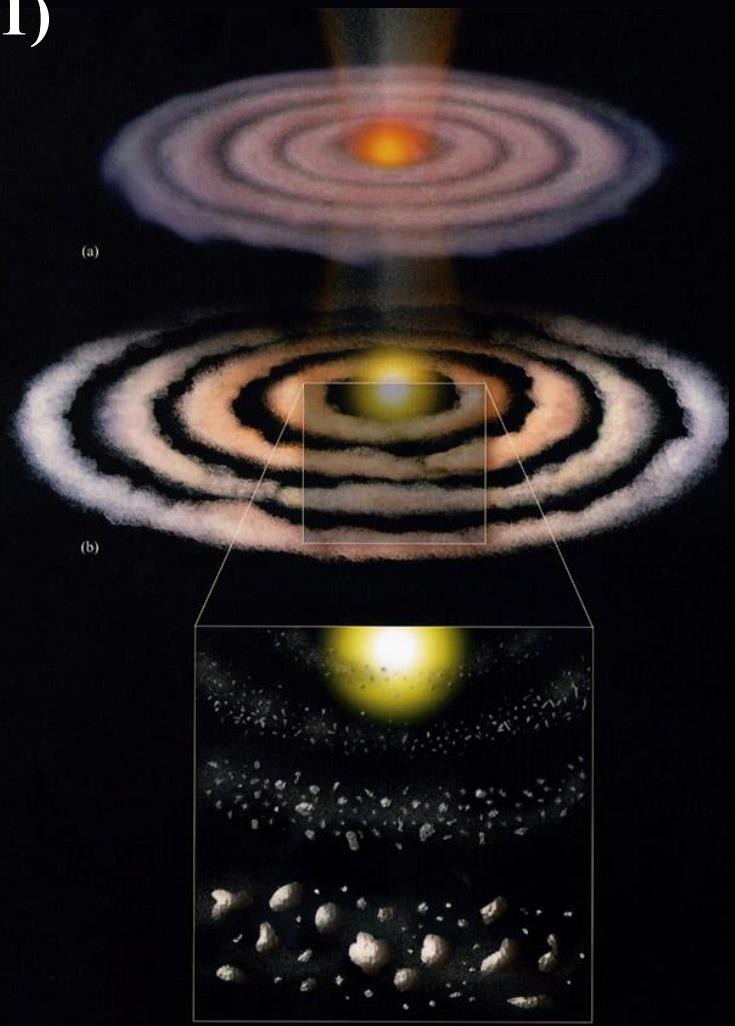


L1 Système Terre - Cours 8 & 9 : Histoire de la Terre

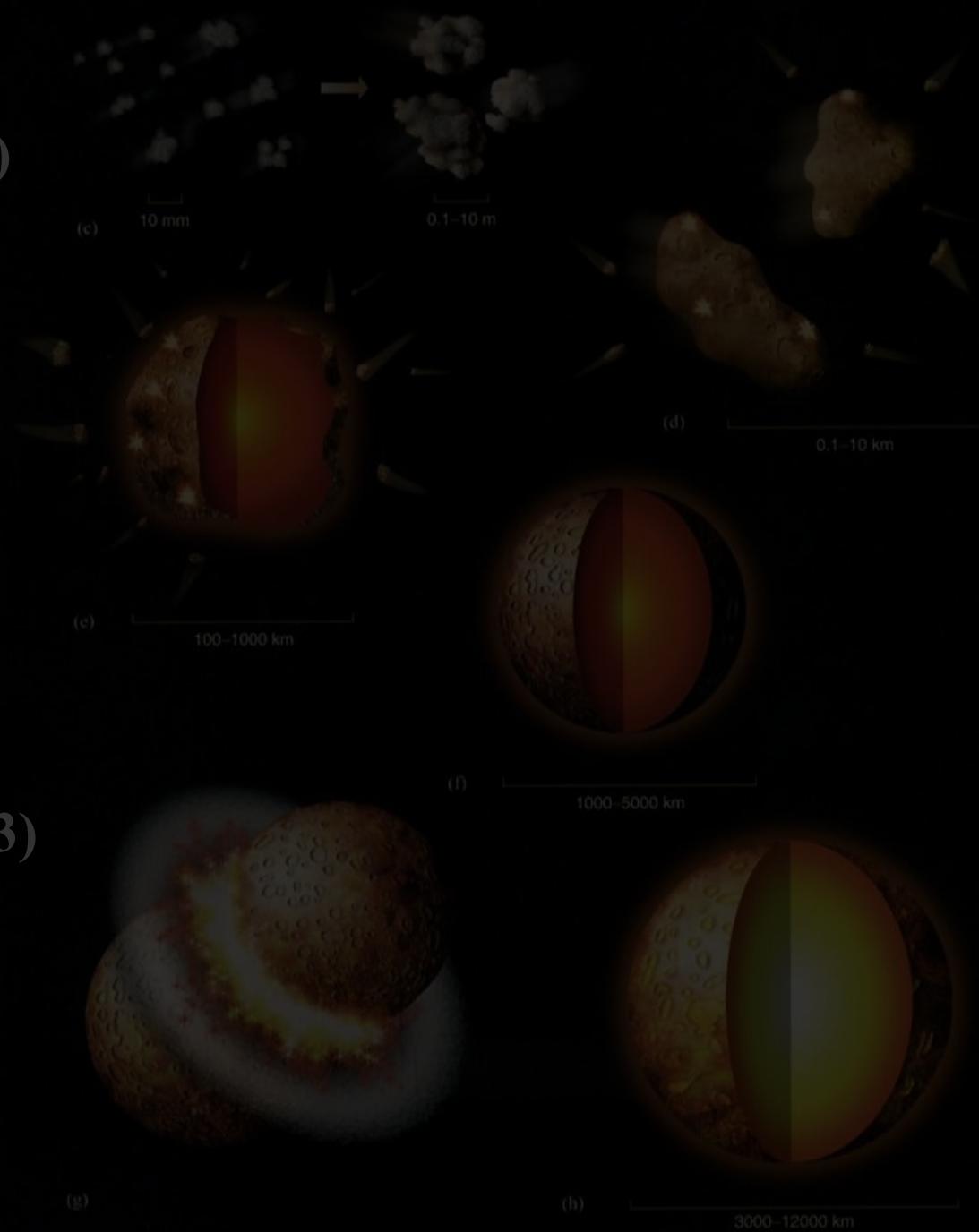
- I. Préambule
- II. L'Hadéen (4,55 – 4 Ga)
- III. L'Archéen (4 – 2,5 Ga)
- IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)
- V. Evolution de l'atmosphère terrestre depuis sa formation
- VI. Les premières formes de vie
- VII. Le climat au Précambrien
- VIII. Synthèse

Formation de la Terre *en résumé*

1)



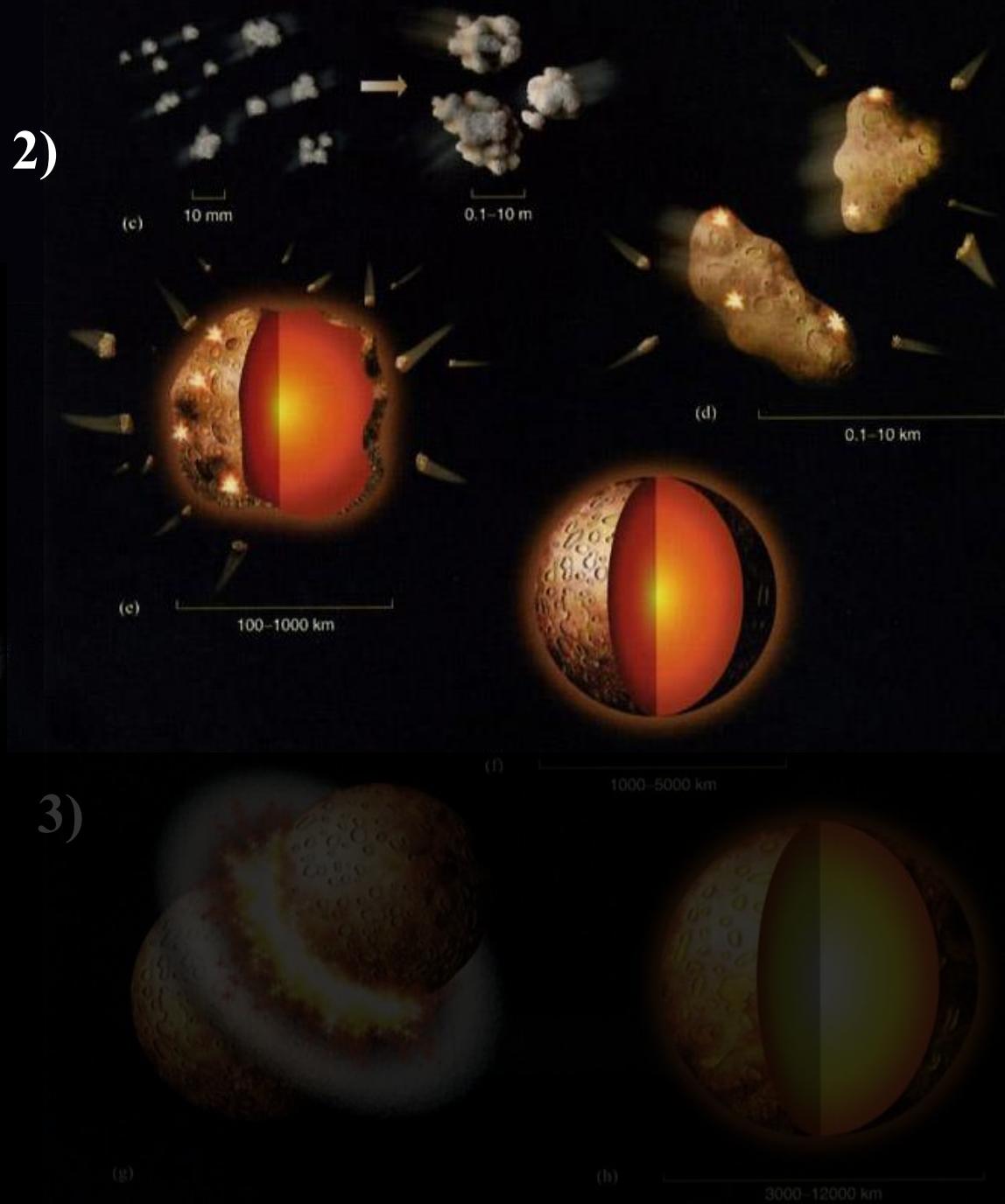
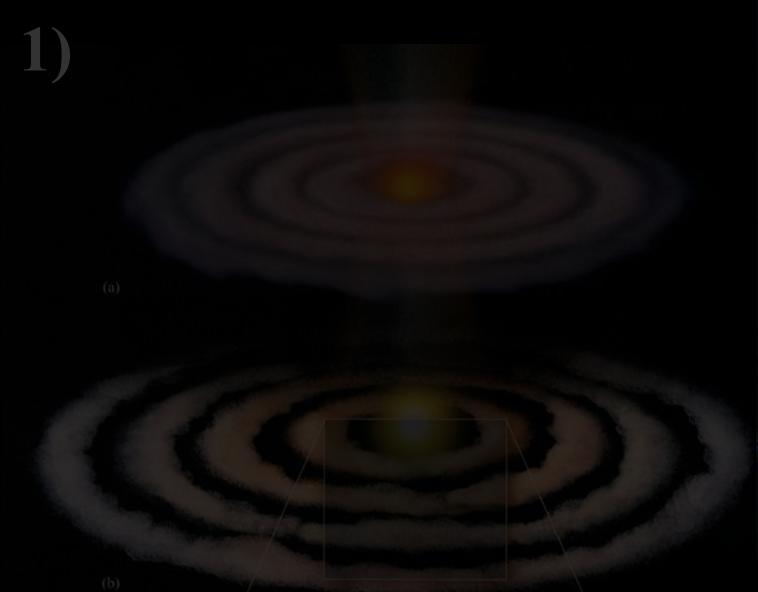
2)



3)

Formation de la Terre *en résumé* 2)

1)



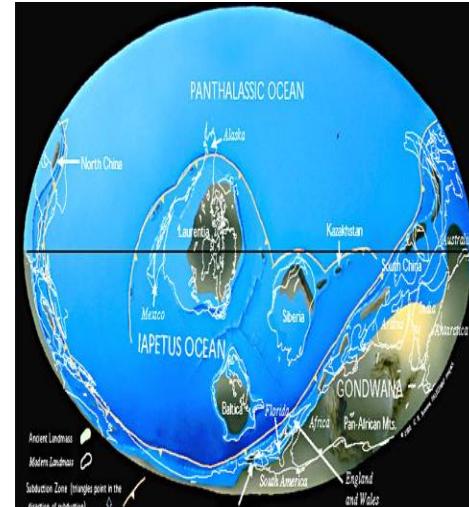
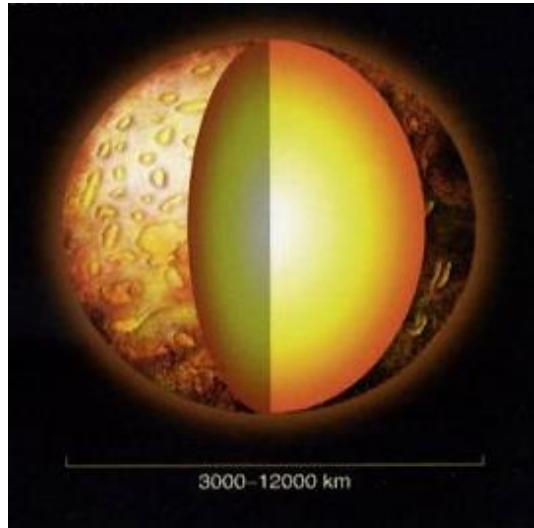
3)

I. Préambule

Précambrien; 4 Ga pour passer:

de la Terre primitive ...

... à la Terre (presque) actuelle

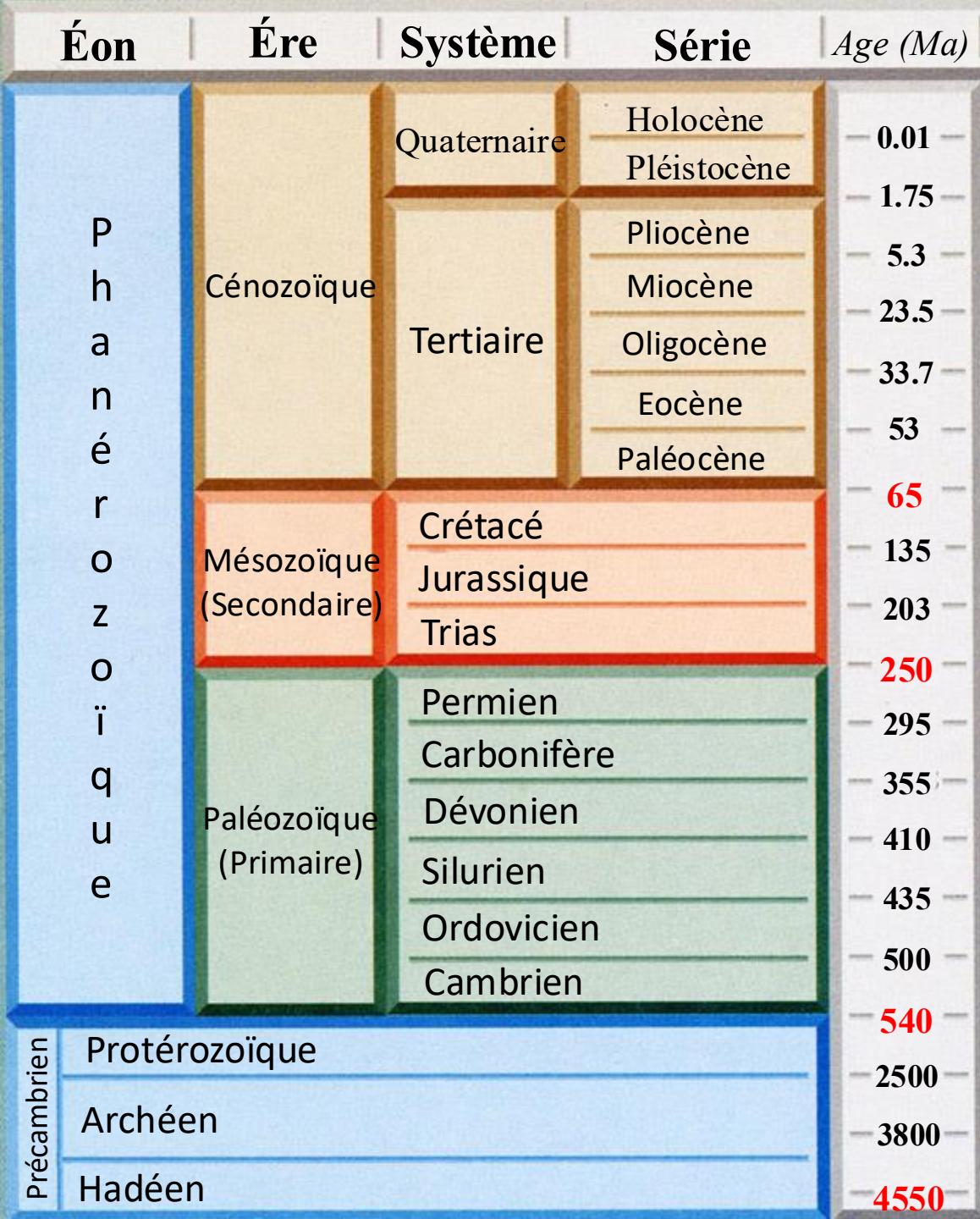


Il faut fabriquer (dans le désordre) :

- Des océans
- Des croutes continentales et océaniques
- Une atmosphère spécifique à la Terre
- La vie !

L'échelle “absolue” des temps géologiques

4 Ga {



I. Préambule

I. Précambrien
01/01 - 19/11

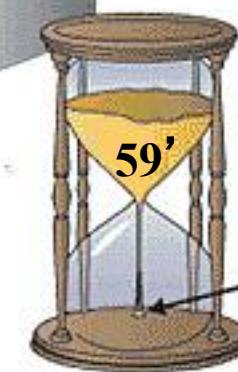


II. Phanérozoïque
Paléozoïque →
20/11 - 12/12

November	December
20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
December	
	28 29 30 31

Mésozoïque
13/12 - 27/12

Cénozoïque
28/12 - 31/12



Dernière
heure du
31/12

Les
Hominidés

I. Préambule

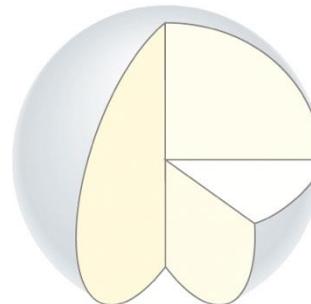
Le Précambrien: 88% de l' histoire de la Terre



- **Hadéen**, 1^{er} Eon, de 4,55 à 4 Ga
dérive d'Hadès, nom du dieu grec des enfers
- **Archéen**, de 4 à 2,5 Ga
dérive d'archos, ancien en grec
- **Protérozoïque**, de 2,5 Ga à 0,54 Ga
les « premières » formes de vie

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

1) A la fin de l'accrétion, on a une Terre homogène



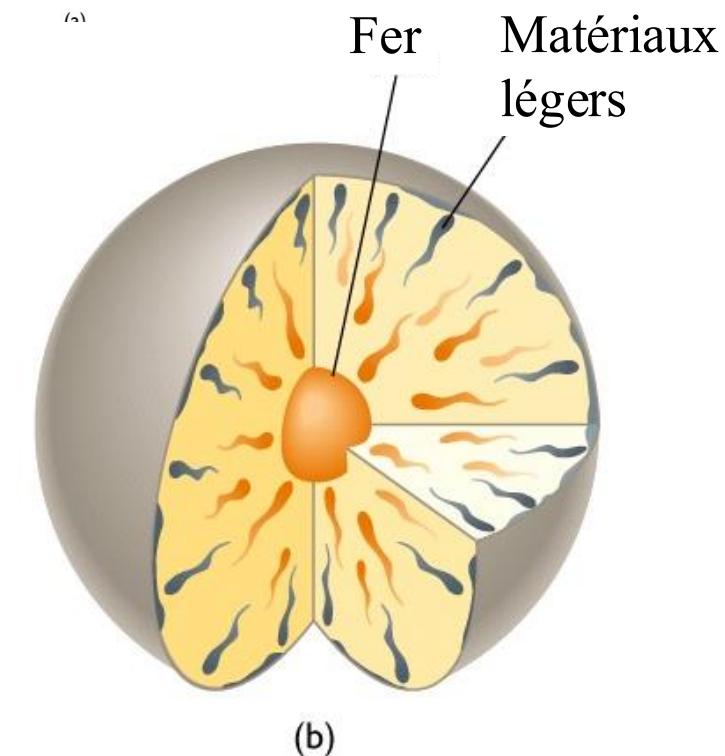
2) Vers 30-40 Ma après, début de la différenciation

Les éléments lourds migrent vers le noyau.

→ Condition pour la naissance du champ magnétique

Les éléments légers se retrouvent dans l'atmosphère ou la croûte primitive.

Les autres constituent le manteau.



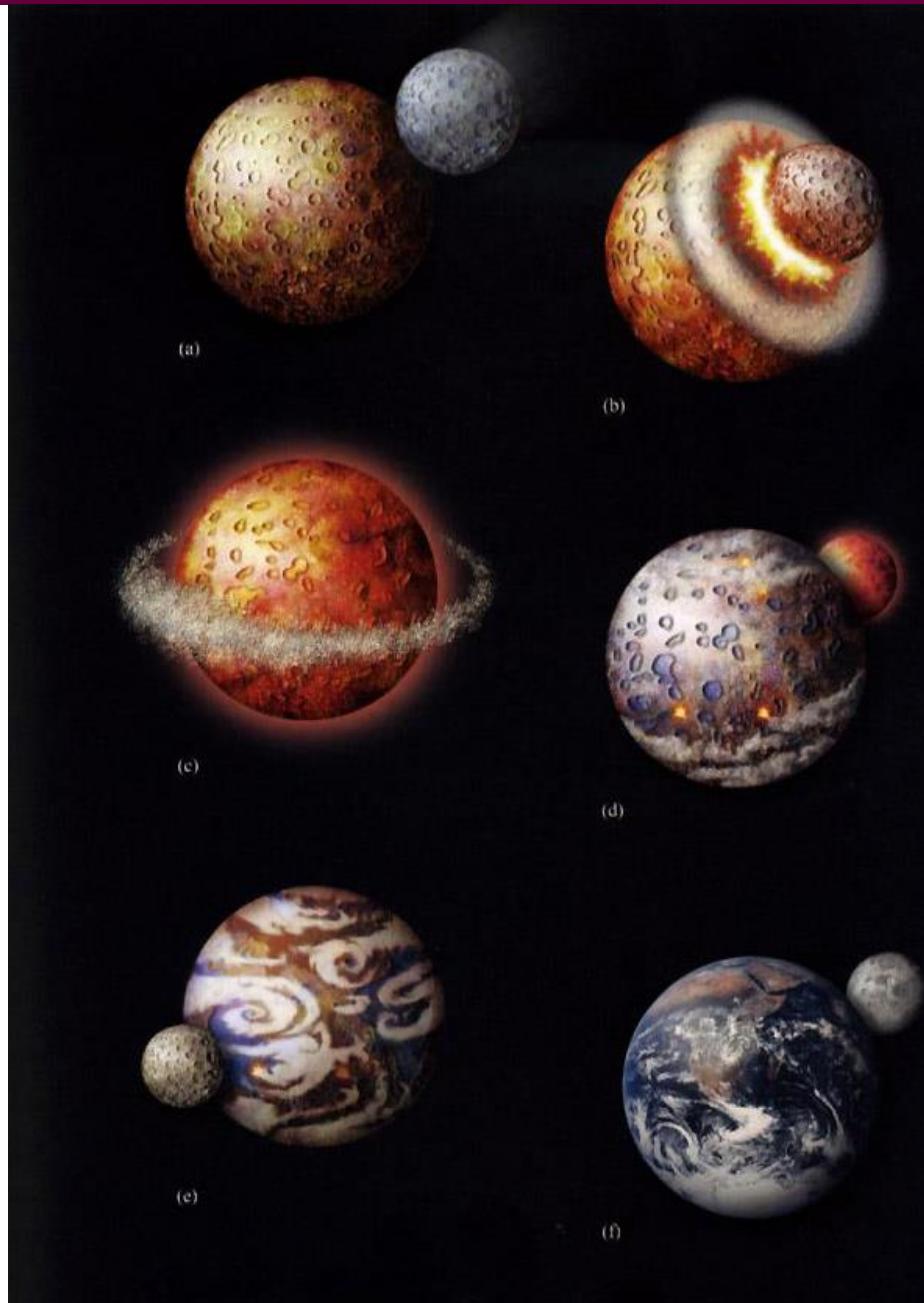
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

3) Formation de la Lune vers 60-90 Ma

Après sa différenciation, la Terre a subi un impact géant qui a donné naissance à **la Lune**.



La Lune est composée de matériaux extraits du manteau terrestre et de l'impacteur



II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

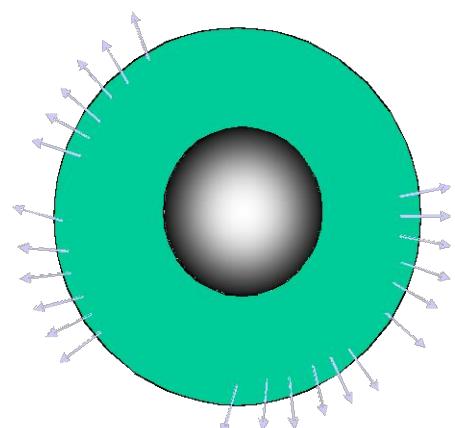
4) Origine de l'atmosphère terrestre

Atmosphère **primaire** (nébuleuse solaire: H, He)

$< 10 \text{ Ma}$ 

Ejectée par les puissants vents solaires déclenchés par l'allumage du soleil

Atmosphère **primitive** (secondaire)



- Source interne **qq 10 Ma**

DEGAZAGE DU MANTEAU
(via magmatisme, différenciation)

 $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$

- Source externe

 $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$

ATMOSPHÈRE DES PLANÈTES TELLURIQUES

H₂ et He dans l'espace (trop léger)

MERCURE	VENUS	TERRE	MARS
Atmos.	aucune	Très dense	Dense
Compl1		CO ₂	N ₂
Comp2		N ₂	O ₂
Proportion		19/1	4/1
		Aujourd'hui !	H ₂ O : glaces ?

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES

MERCURE



Pas d'atm.

VENUS



Atm = CO₂

TERRE



MARS



Faible Atm.

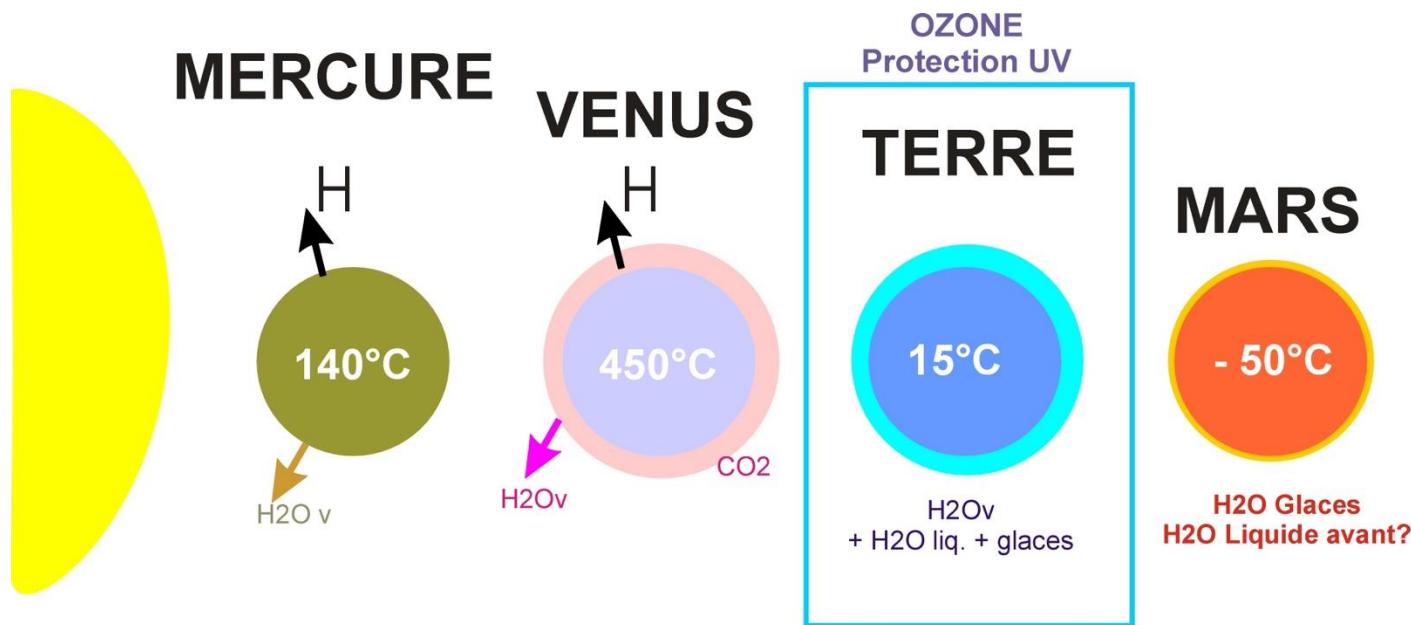
**TOUTES CES PLANETES
avaient peu après la
formation du système
solaire des atmosphères
primitives similaires**

**CO₂ = 19 %
H₂O = 80 %
N₂ ~ 1%
H₂
He**

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

5) Formation des océans

Condensation de la vapeur d'eau quand T suffisamment basse



Mais d'où vient cette eau ?

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

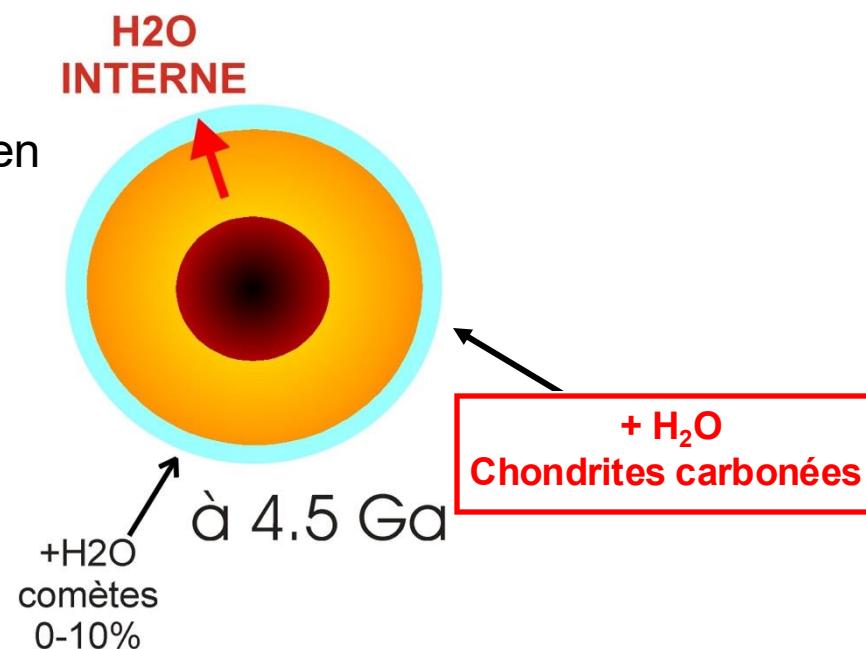
5) Formation des océans

3 sources possibles:

- DEGAZAGE du manteau via activité volcanique
-> apport initial lors de l'accrétion par les chondrites à enstatite (5% H₂O)

- Apport **tardif** par des METEORITES riches en H₂O (~20%) Les chondrites carbonées

- IMPACTS **tardifs** de COMETES

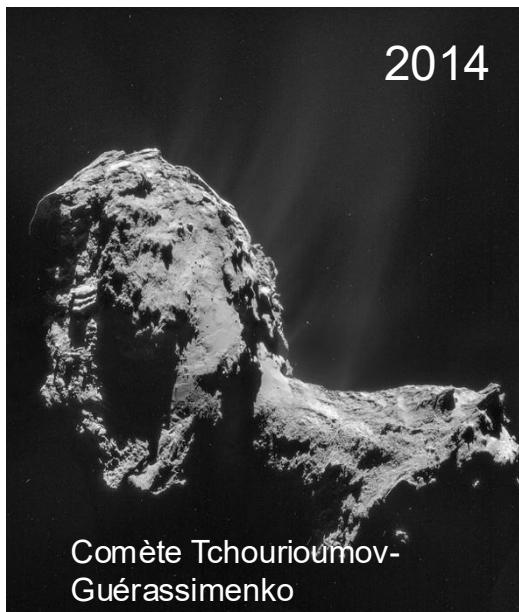


II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

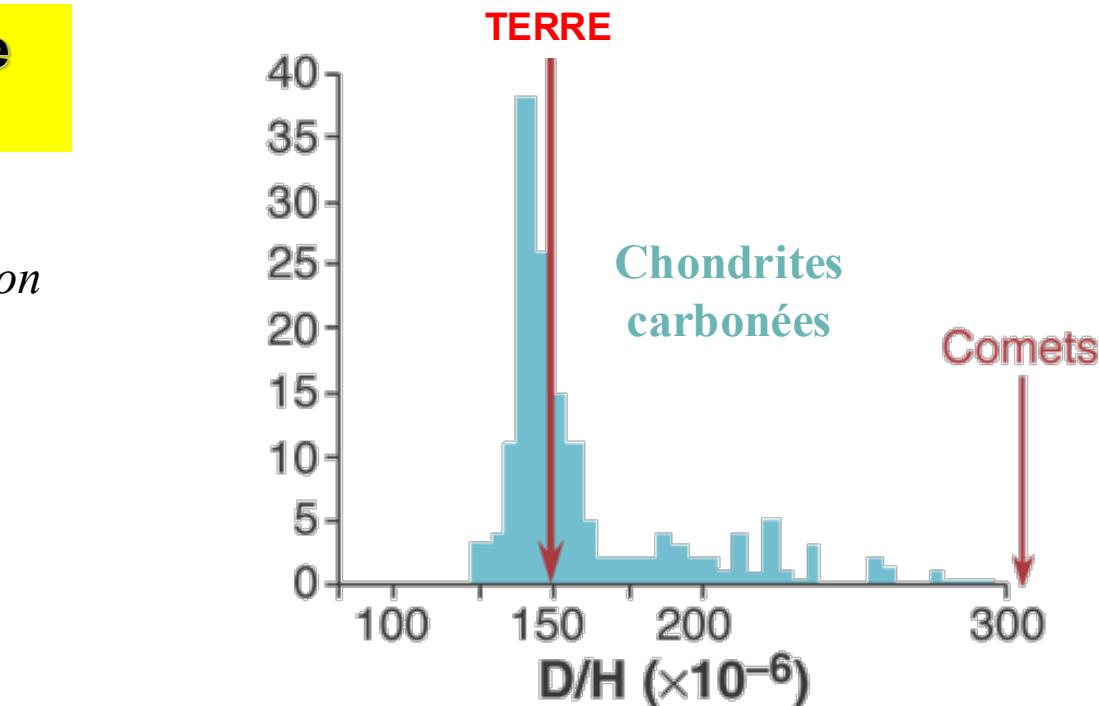
**La réponse est donnée
par le rapport D/H**

Hydrogène: 1 proton

Deutérium: 1 proton + 1 neutron



Ces nouvelles données le confirment ($D/H \sim 500 \times 10^{-6}$)



Ce sont les **chondrites carbonées et/ou les chondrites à enstatite** qui ont apporté l'eau des océans.
(Ce ne sont pas les comètes)

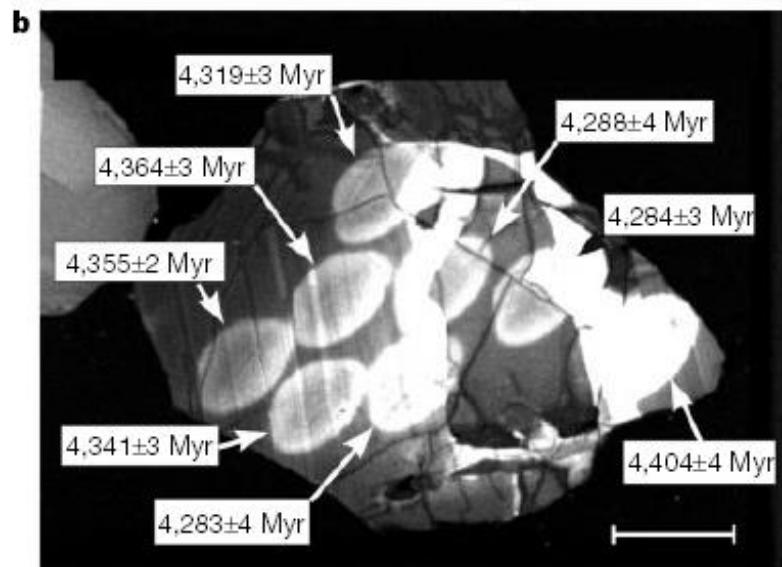
Mais depuis quand ?

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

La réponse provient de minéraux détritiques datés à 4.4 Ga



zircons détritiques présents dans des métasédiments



**4,404 ± 0,008 Ga : zircons détritiques les plus anciens (Australie) ⇒
âge minimum pour la croûte continentale et ...**

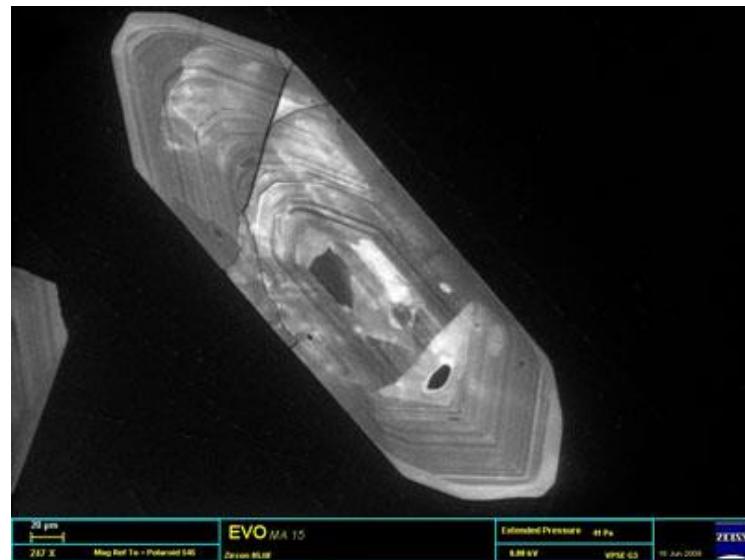
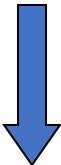
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

4,404 ± 0,008 Ga : ⇒ âge minimum également pour la formation des océans (eau à l'état liquide)

Arguments principaux:

1) Le rapport $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ nous démontre que la source de ces magmas a été fortement contaminé par de l'eau liquide

2) Présence d'inclusion de minéraux hydratés dans ces zircons

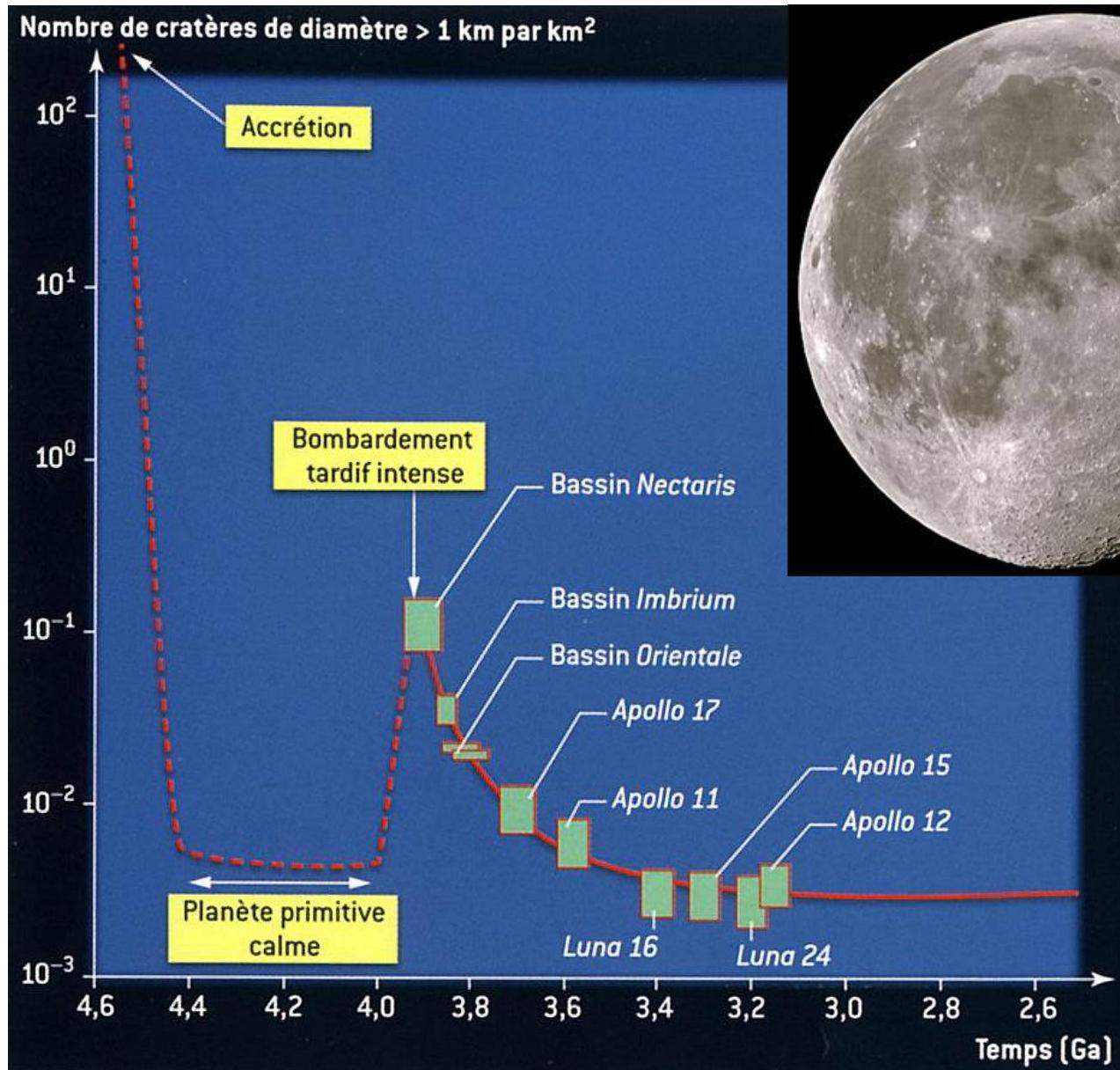


Les océans sont présents depuis 4,4 Ga !

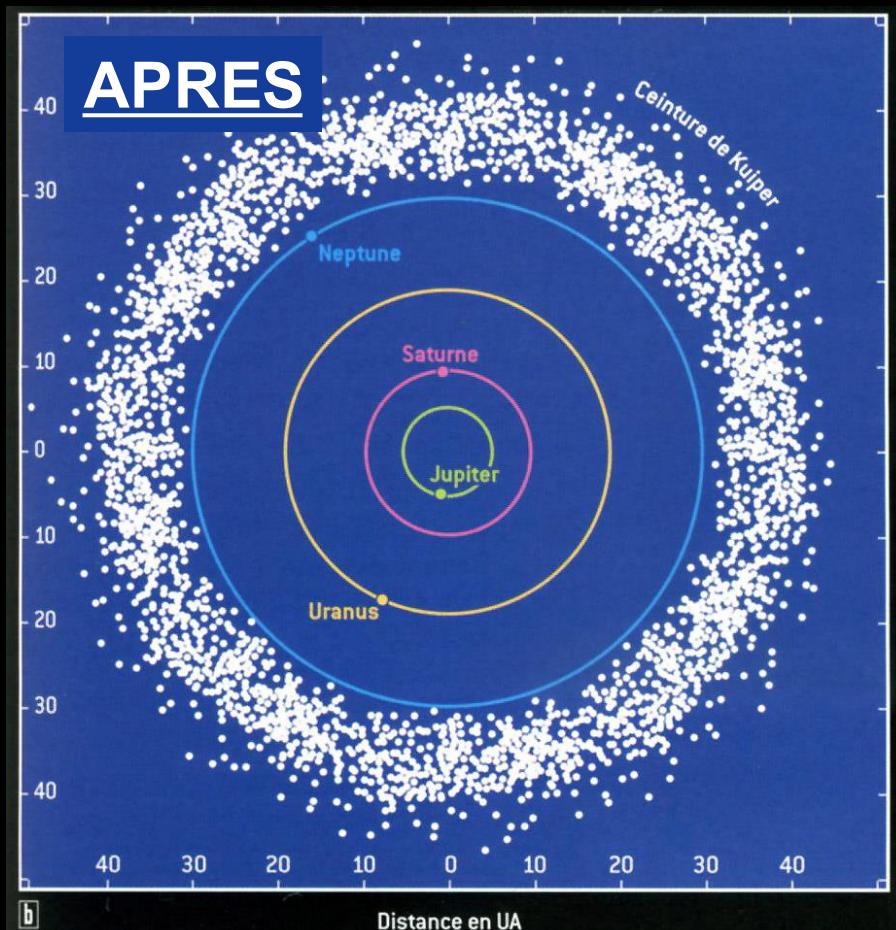
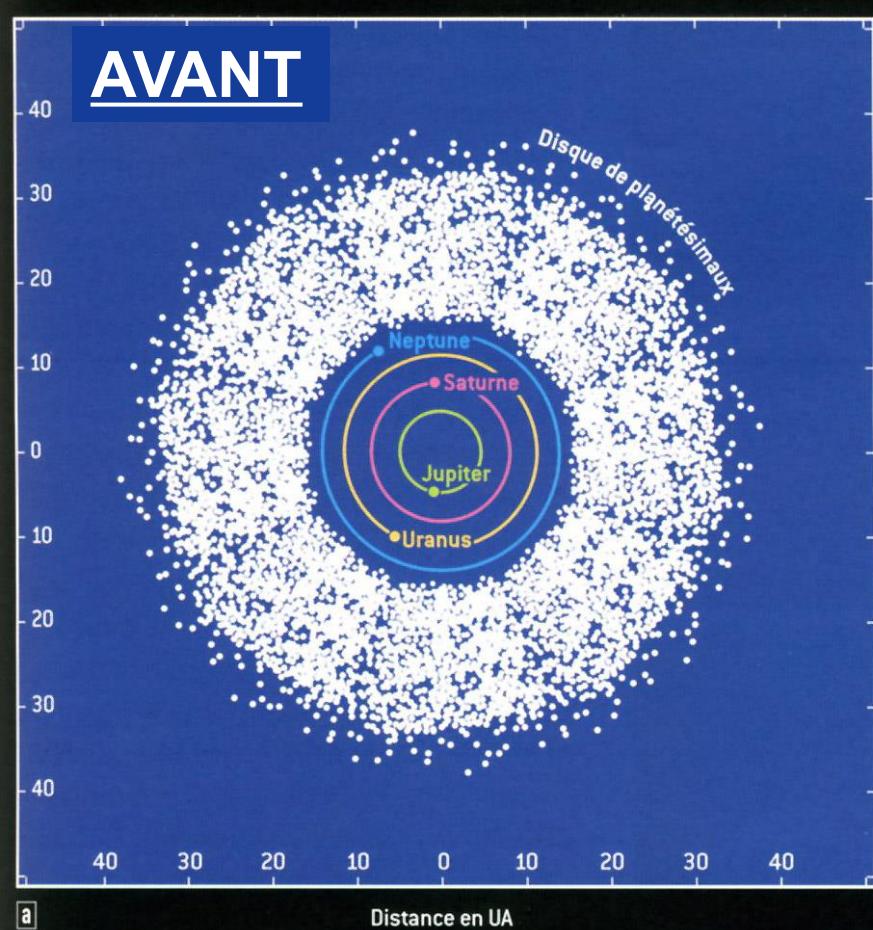
Mais, ils se sont définitivement stabilisés après 3,9 Ga...

Le bombardement météoritique tardif (~ 4 Ga)

Il met fin à un période plutôt calme de 0,4 Ga.



Le bombardement météoritique tardif (~ 4 Ga)



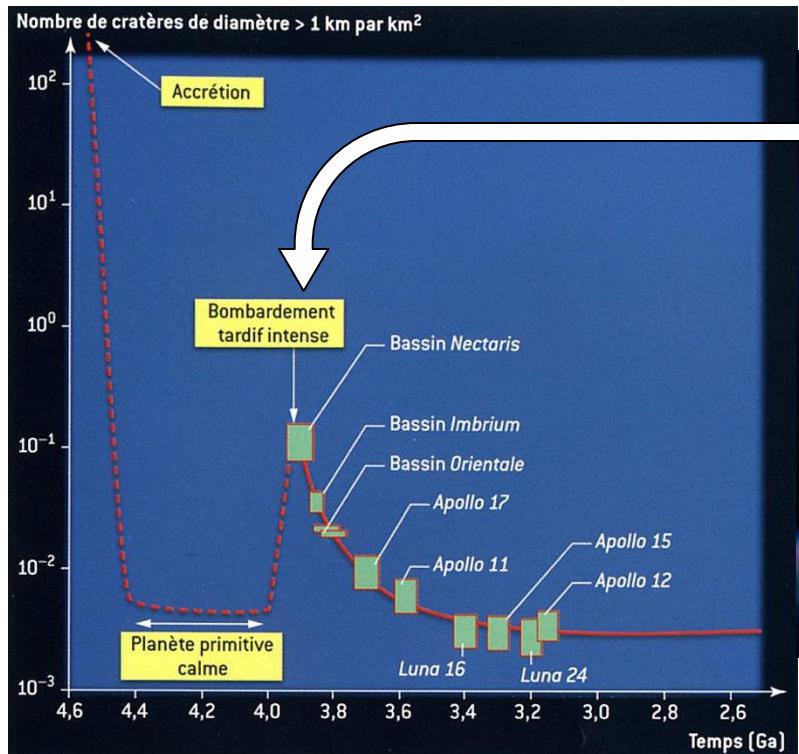
Jupiter dérivant vers le centre du système solaire et **Saturne** s'en éloignant sont entrées en résonance. Cela a déstabilisé l'orbite des planètes géantes. **Neptune** a alors croisé le disque externe rempli de planétésimaux

→ **bombardement météoritique tardif**

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

Le bombardement météoritique tardif (\sim 4 Ga)

Il met fin à l'Hadéen



On estime le nombre d'impacts à 22 000 pour la Terre (1700 pour la Lune).

40 à 200 d'entre eux avaient plus de 1000 km de diamètre.

-> une partie des océans est vaporisée à plusieurs reprises

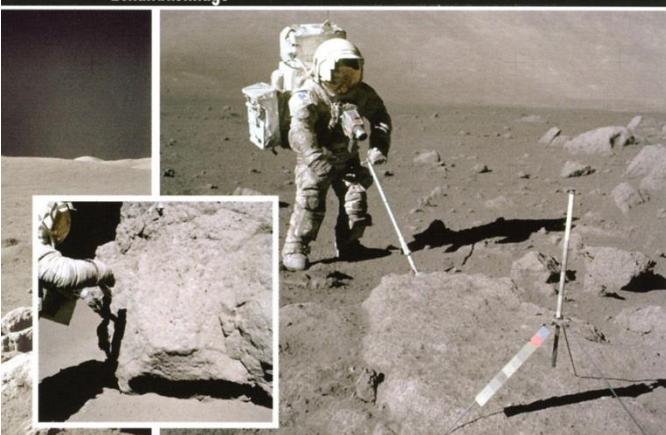
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

Formation des premières roches

À l'Hadéen, on a probablement la formation de croûte primitive dès 4,4 Ga avec le refroidissement de l'océan magmatique



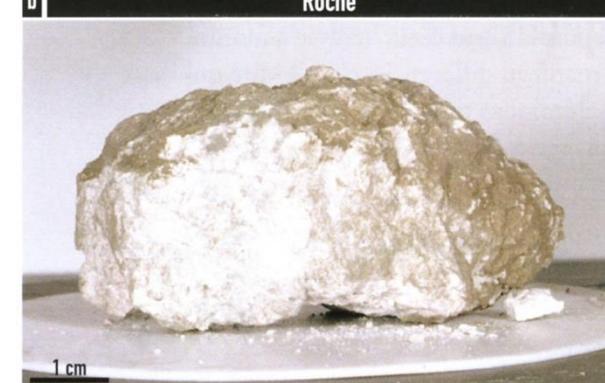
Échantillonnage



On a vu les preuves
de l'océan
magmatique lunaire

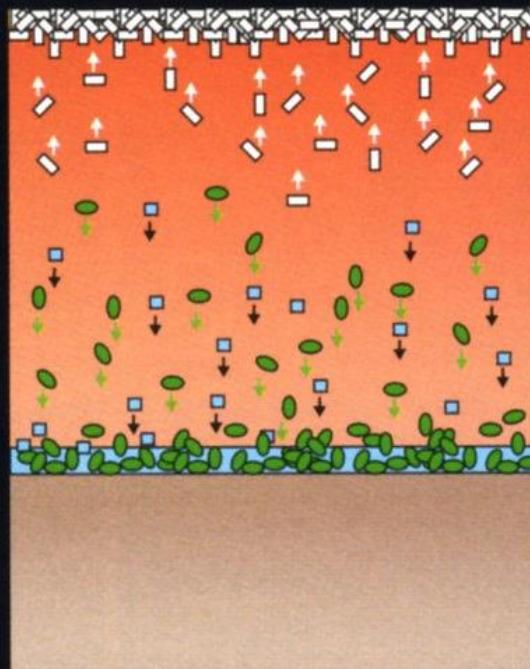
b

Roche



MANTEAU FONDU
=
OCÉAN MAGMATIQUE

MANTEAU
NON FONDU



Cumulat de plagioclase = croûte anorthositique

Plagioclase, moins dense que le magma : flotte

Olivine Pyroxène } plus denses que le magma : coulent

Cumulat de pyroxène et d'olivine

Idem sur Terre ?

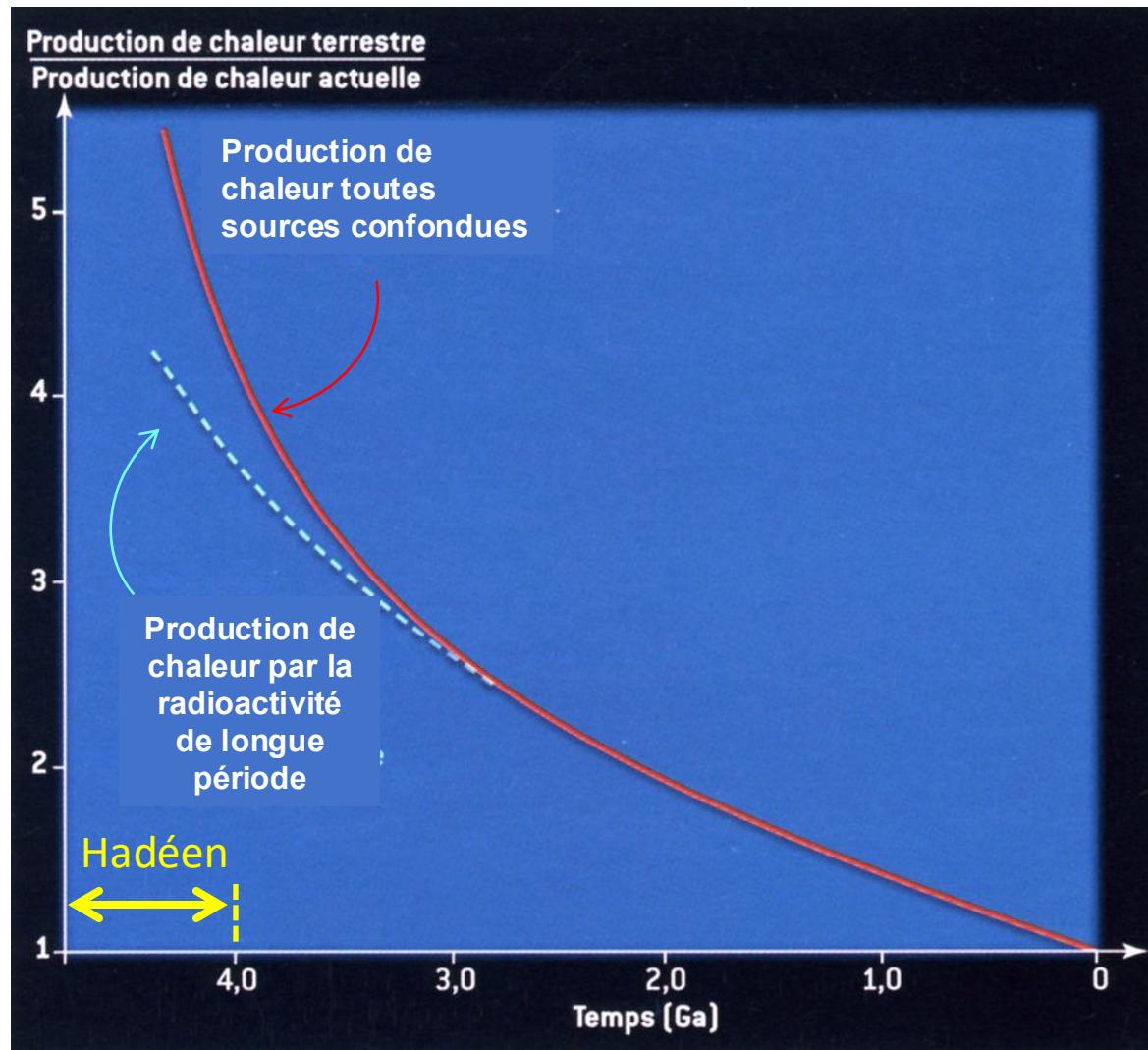
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

Source d'énergie pour faire fondre une partie du manteau :

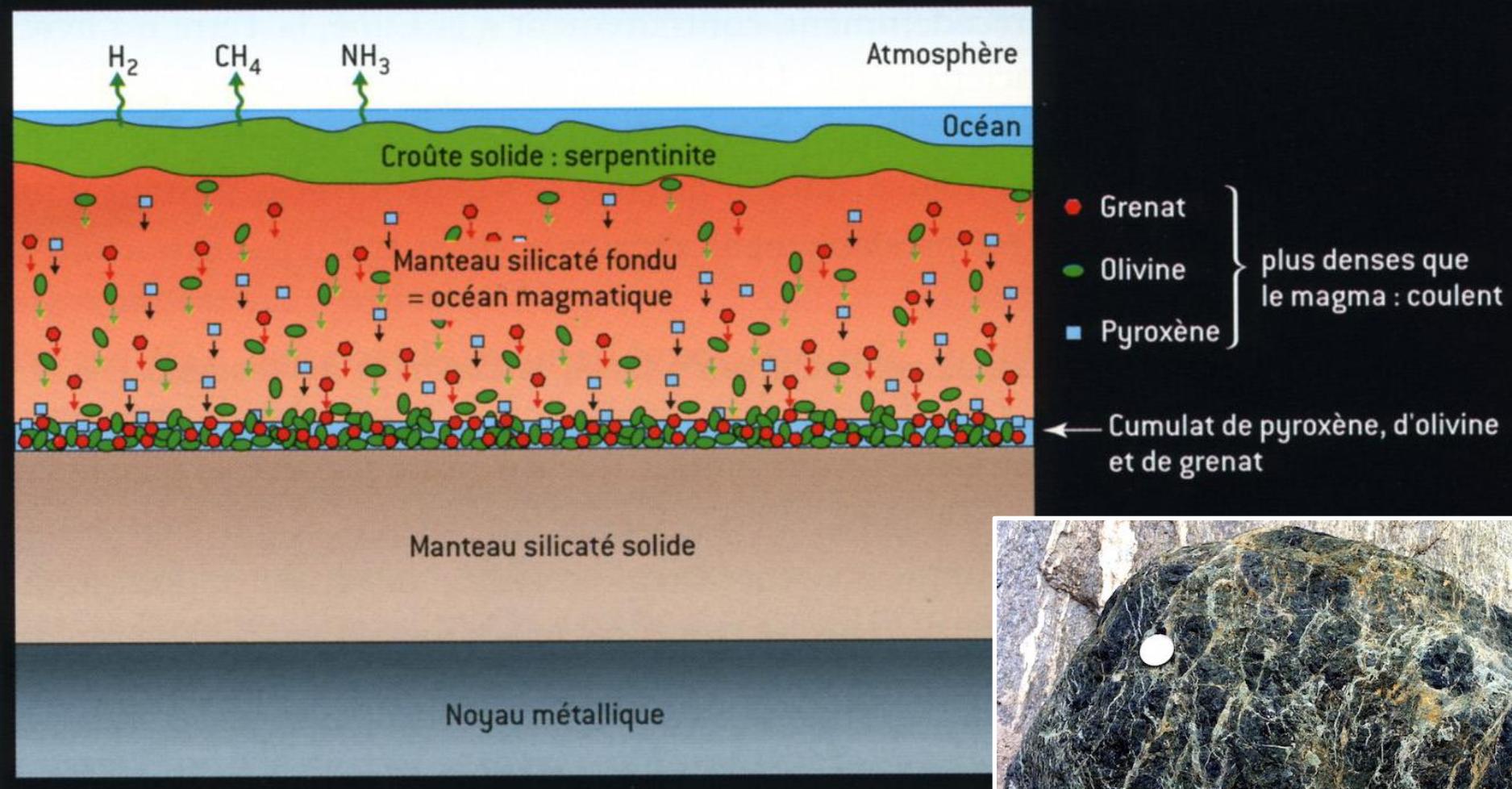
- Contraction gravitationnelle initiale
- Radioactivité (K, U, Th +
 ^{60}Fe , ^{26}Al)

Radioactivité éteinte

Présence d'un océan magmatique !



Lors du refroidissement de cet océan magmatique: formation d'une **croûte océanique primitive**



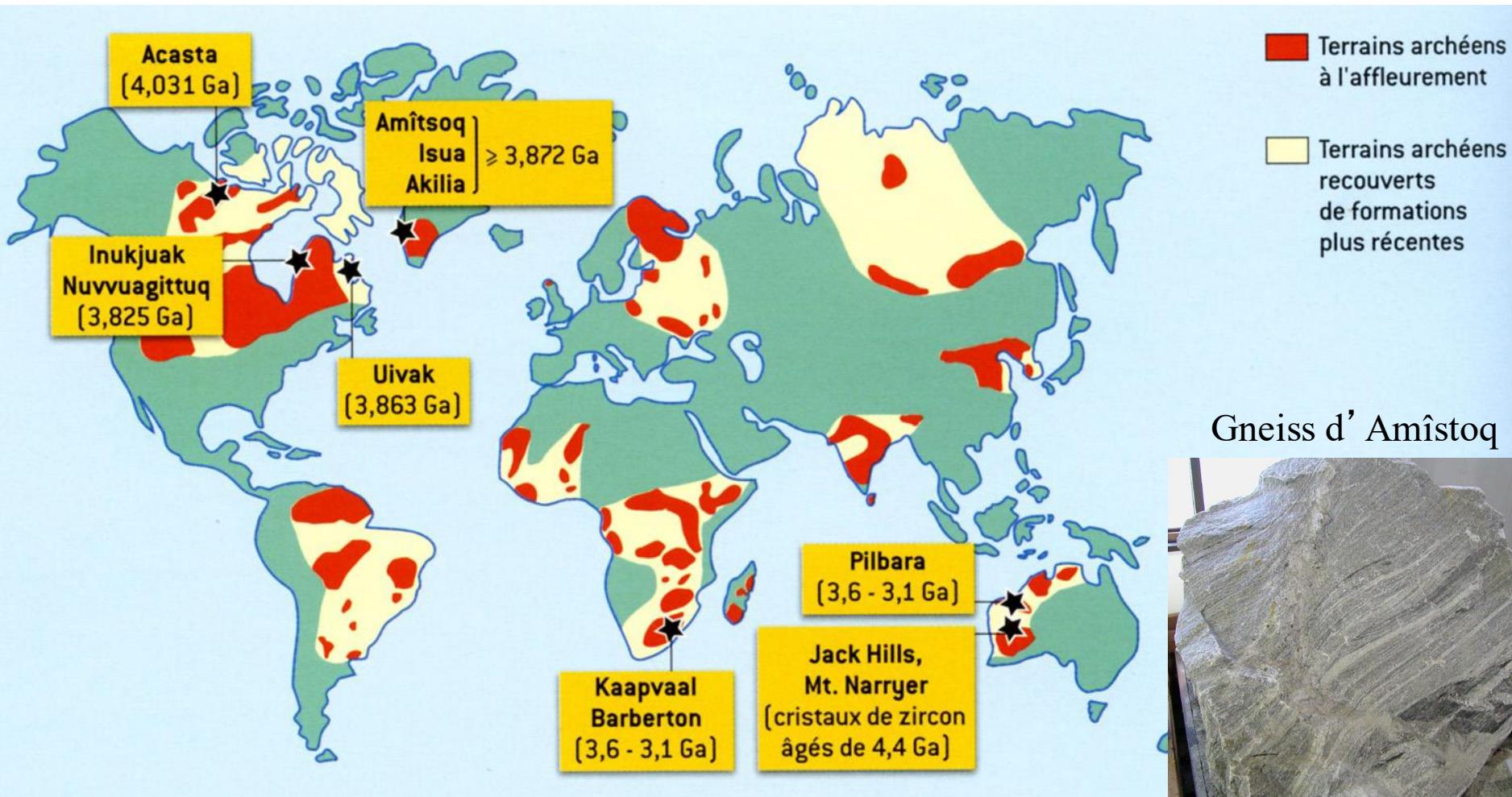
Contrairement à la Lune, les minéraux de cet océan magmatique terrestre se sont accumulés seulement en profondeur (puis ont été brassés par la convection)



Serpentinite
(Altération hydro-thermale
d'une péridotite)

III. L'Archéen (4 - 2,5 Ga)

Localisation des plus vieilles roches de la surface



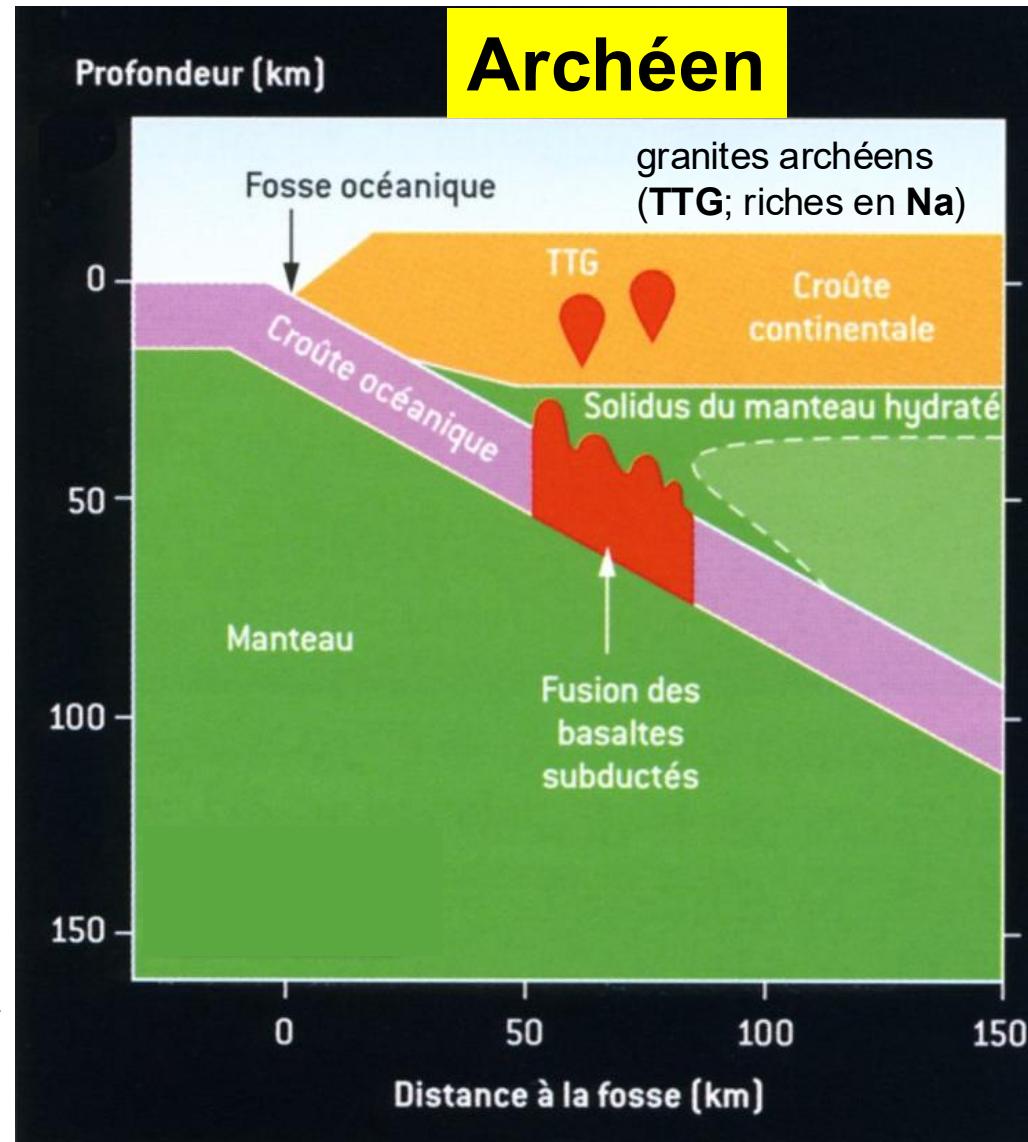
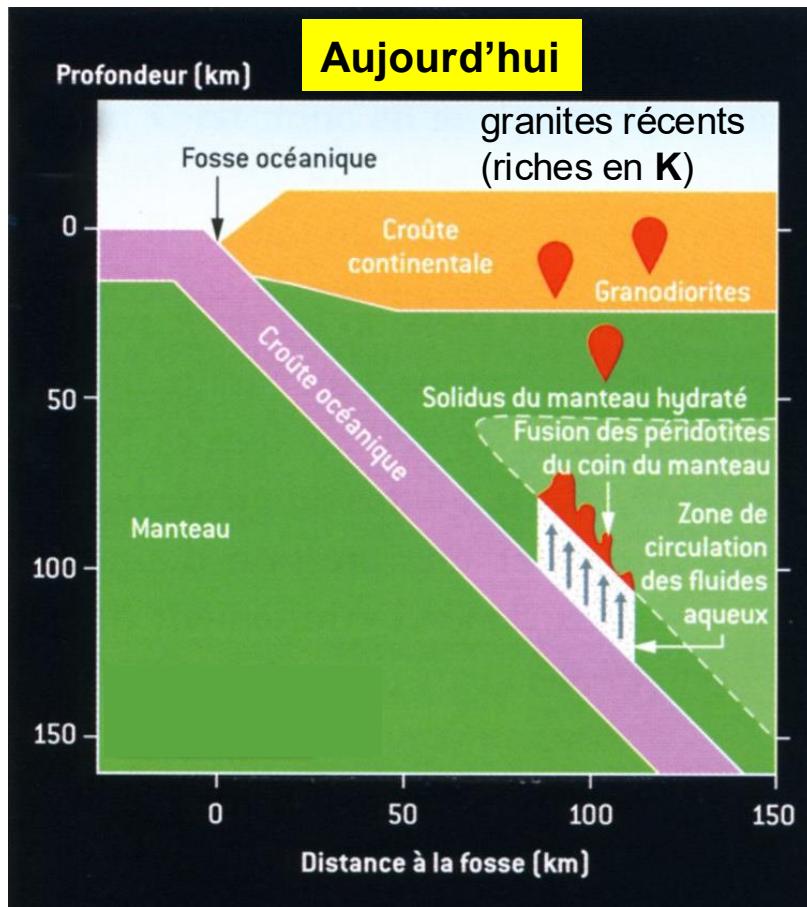
Gneiss d' Amîstoq



Les roches de l'Archéen constituent les premiers continents: les cratons.

Elles ont des caractéristiques uniques dues au fort gradient thermique de l'Archéen.

Mécanisme de fabrication de la croûte continentale



À l'Archéen, gradient géothermique plus fort qu'aujourd'hui

Fusion de la croûte subductée: production des TTG (granites archéens)

-> à l'Archéen, le gradient thermique était plus important qu'aujourd'hui

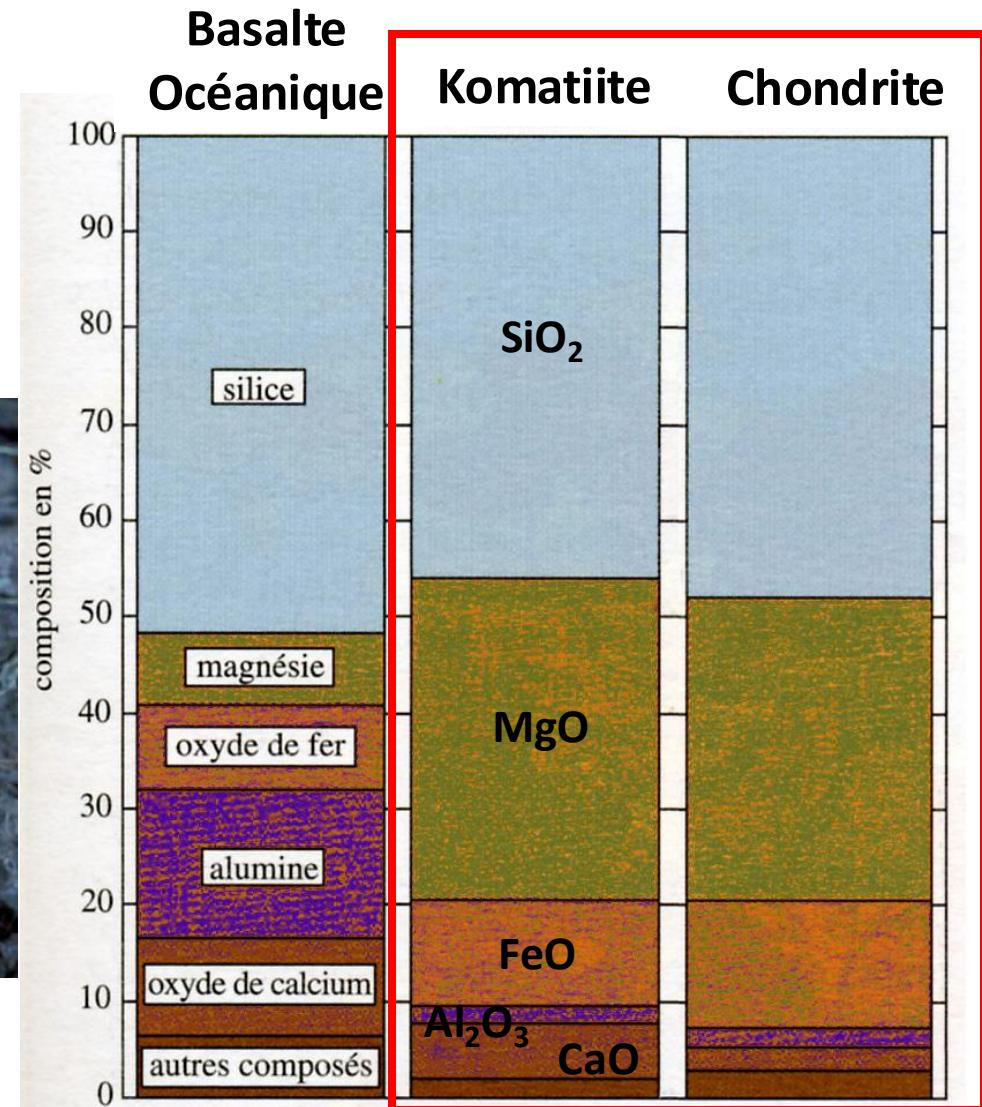
La composition des **komatiites**, basaltes archéens (4-2,5 Ga) révèle des conditions de T de fusion $\sim 1600^{\circ}\text{C}$

(Pour les basaltes actuels $T \sim 1200^{\circ}\text{C}$)

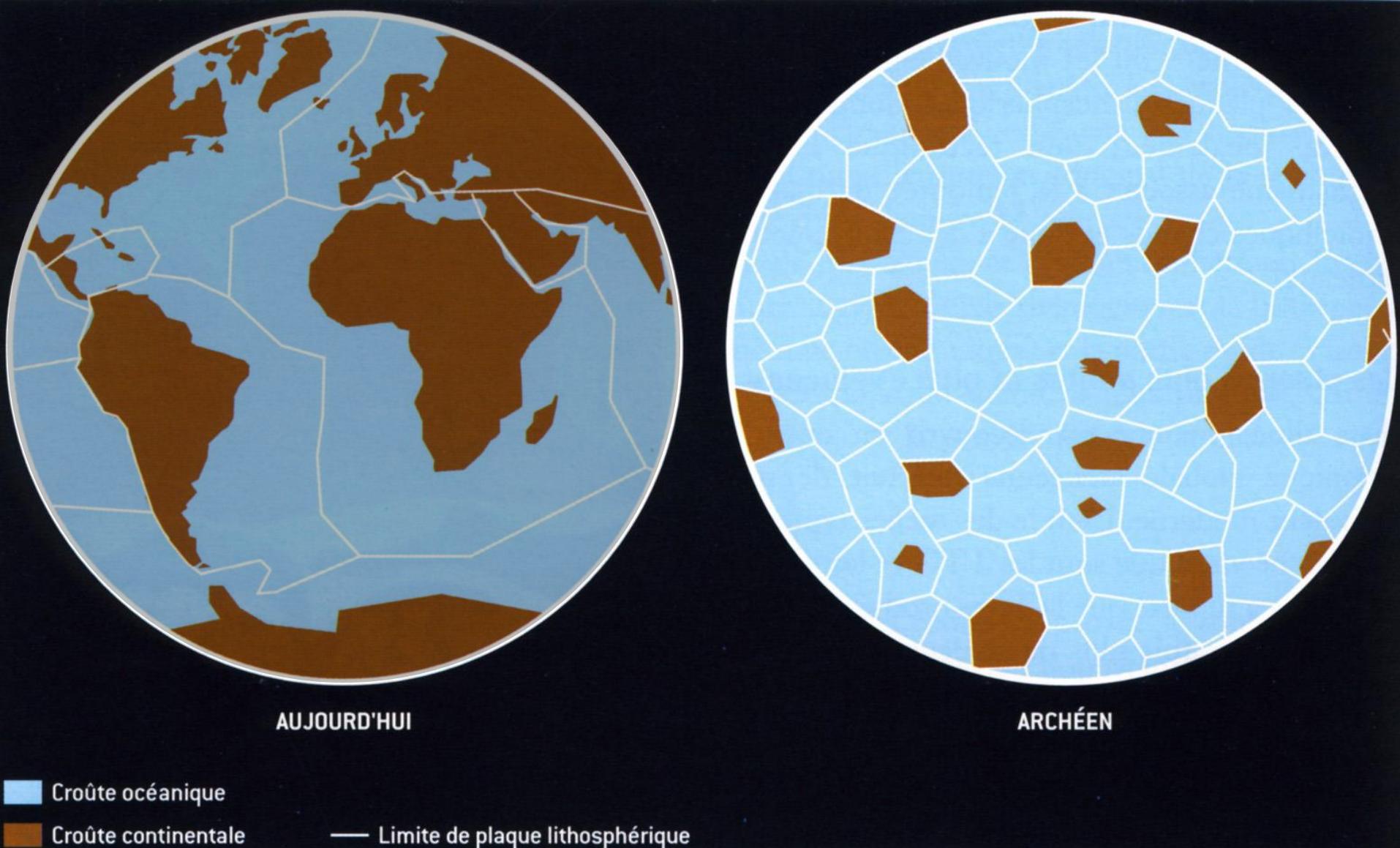
-> taux de fusion partielle très élevé à l'Archéen (jusqu'à 60%)
(aujourd'hui: 20-30% max.)



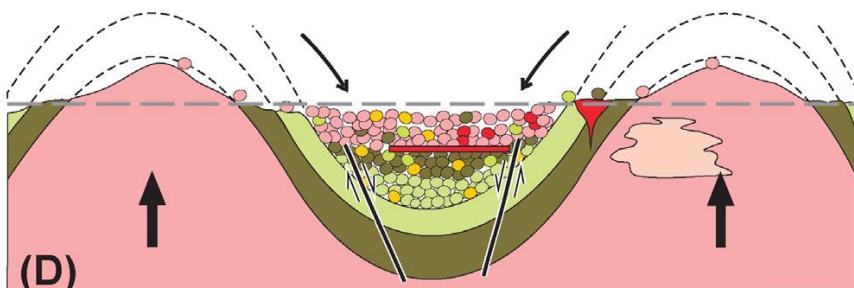
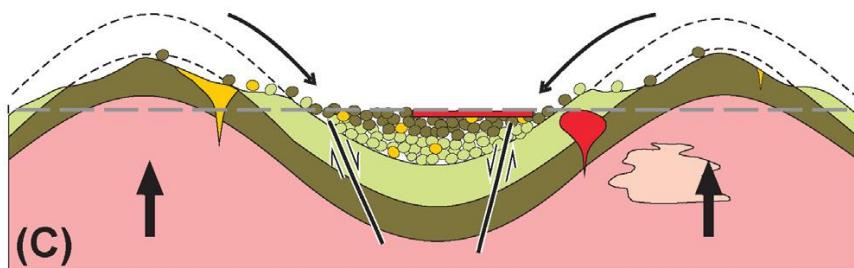
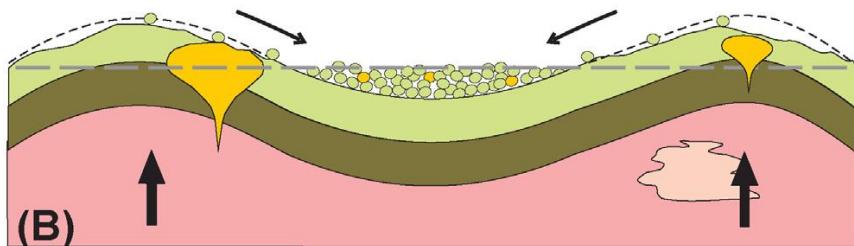
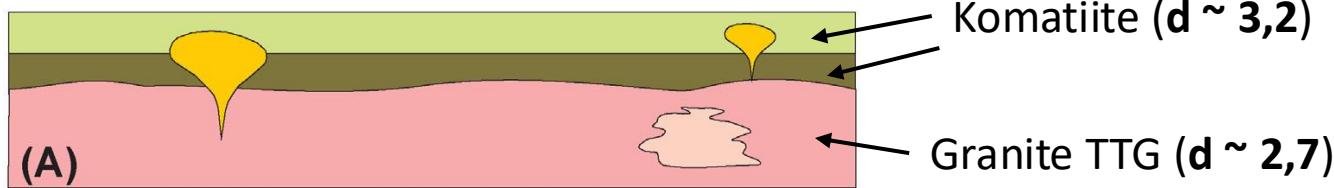
komatiite



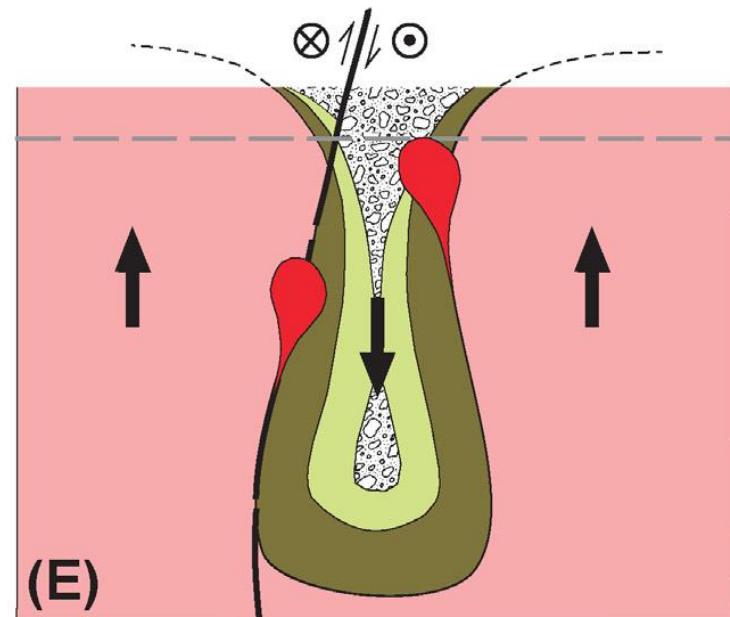
Fort gradient thermique => convection très active
⇒ nombreuses petites plaques tectoniques
(seule la croûte océanique archéenne a été recyclée dans le manteau)



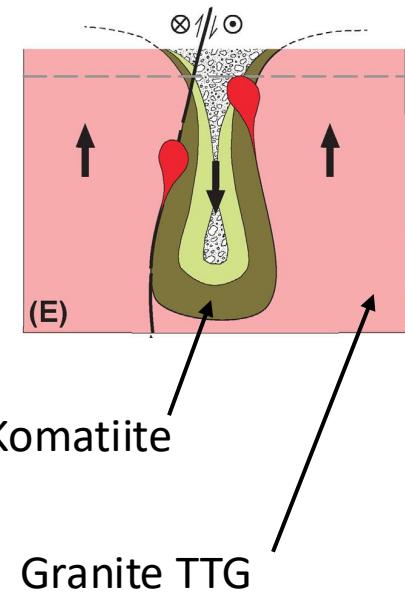
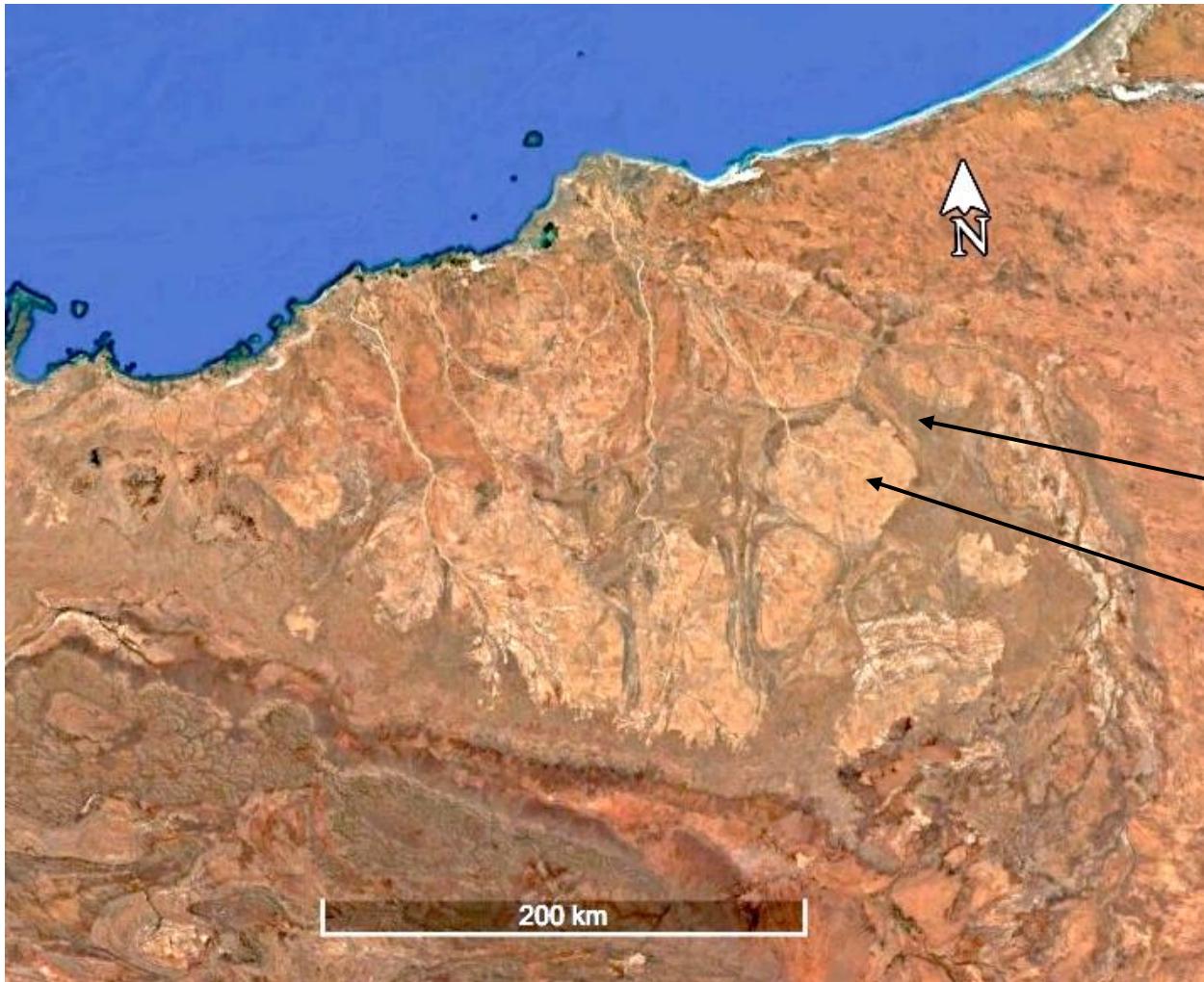
Avec la tectonique horizontale déjà présente, on a également une **tectonique verticale** (sagduction). Elle est uniquement présente à l'Archéen.



Le moteur de cette tectonique est la gravité.

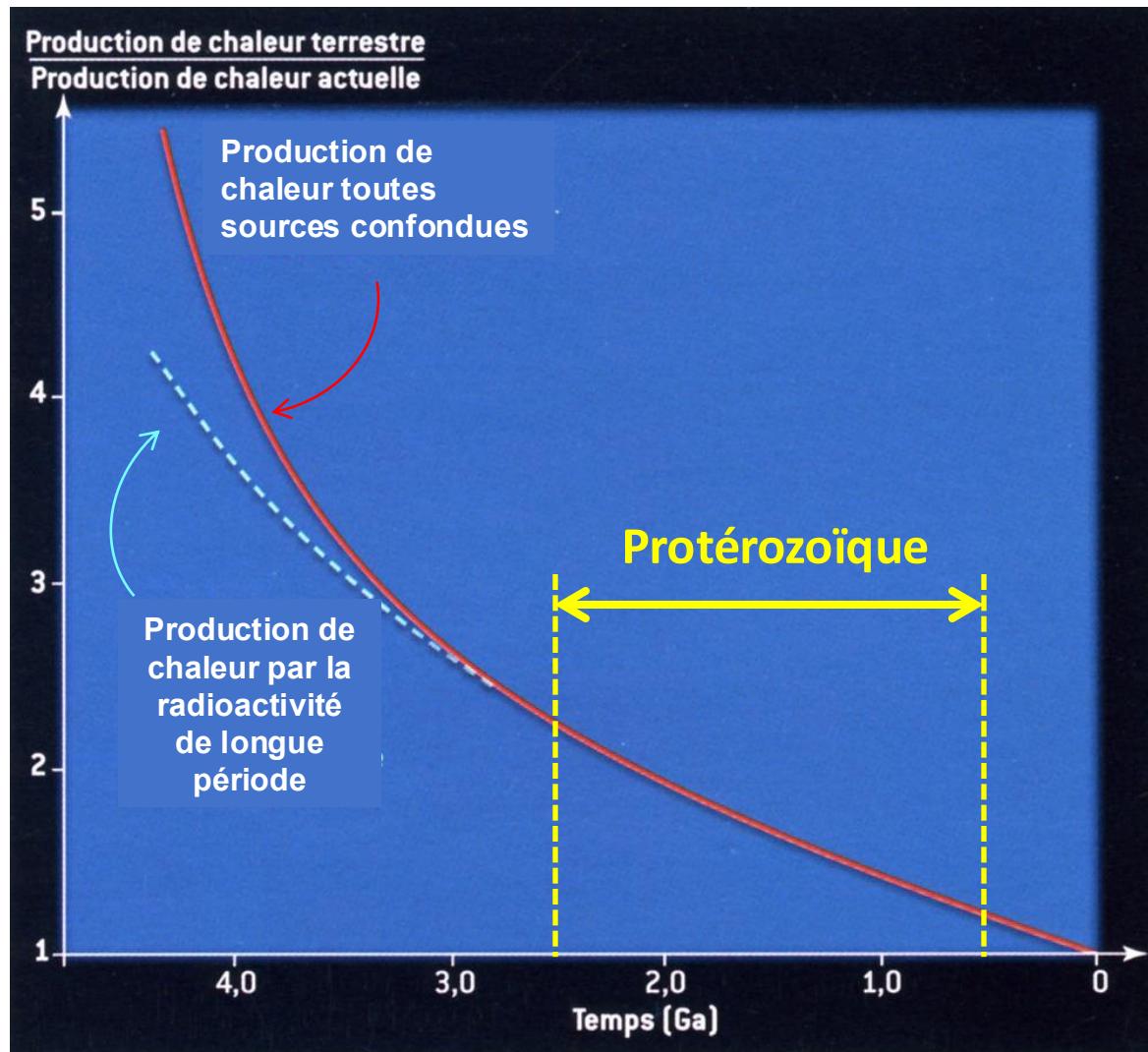


La tectonique verticale (sagduction); exemple de Pilbara (Australie)

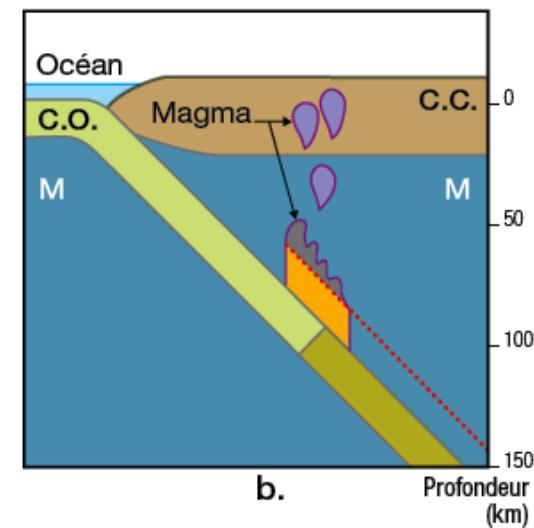


Après 2,5 Ga, le gradient thermique devient trop faible pour la formation des Komatiites: seuls les mouvements horizontaux perdurent.

IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



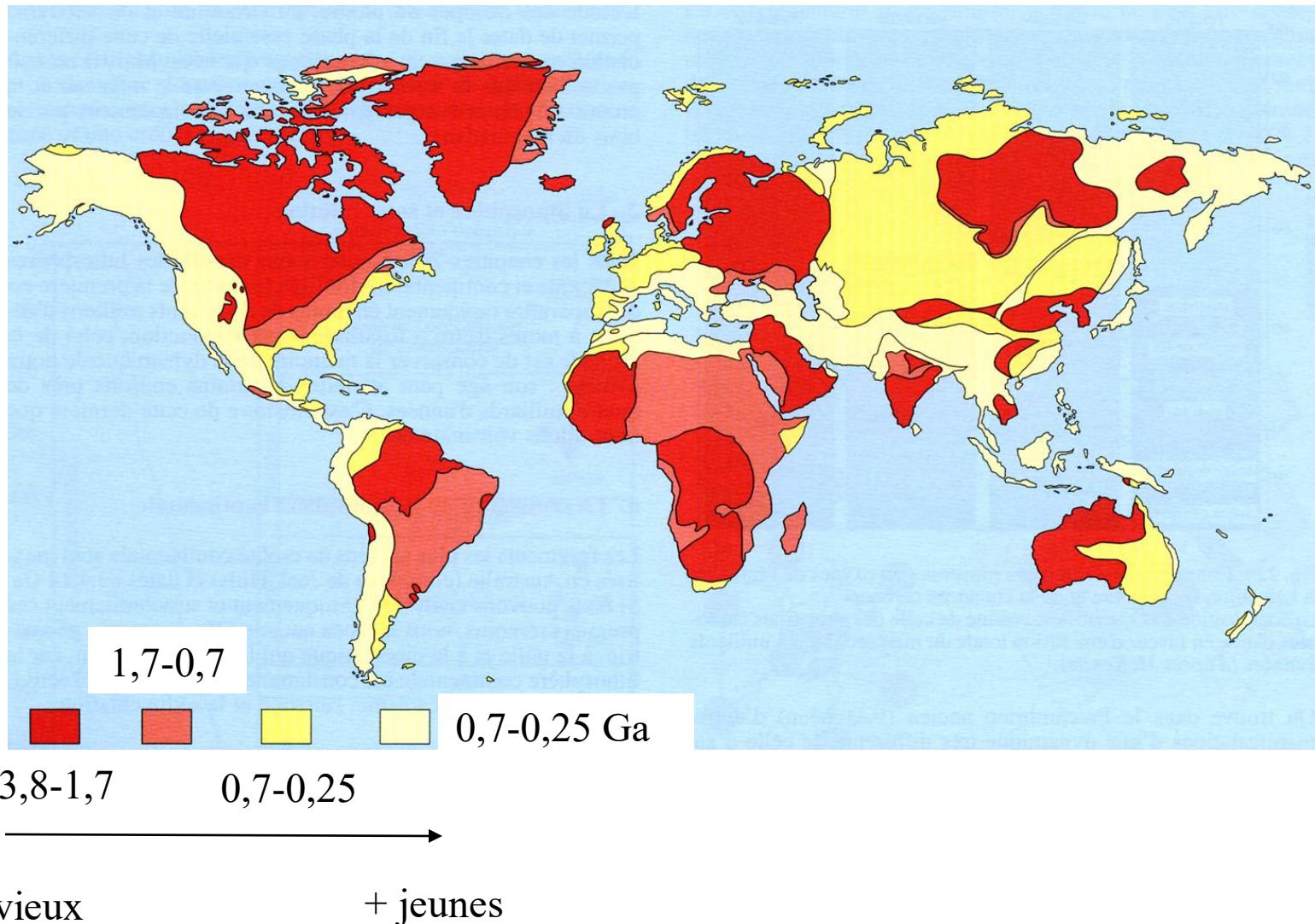
Au Protérozoïque, le gradient thermique devient trop faible pour la formation des Komatiites et des granites TTG.



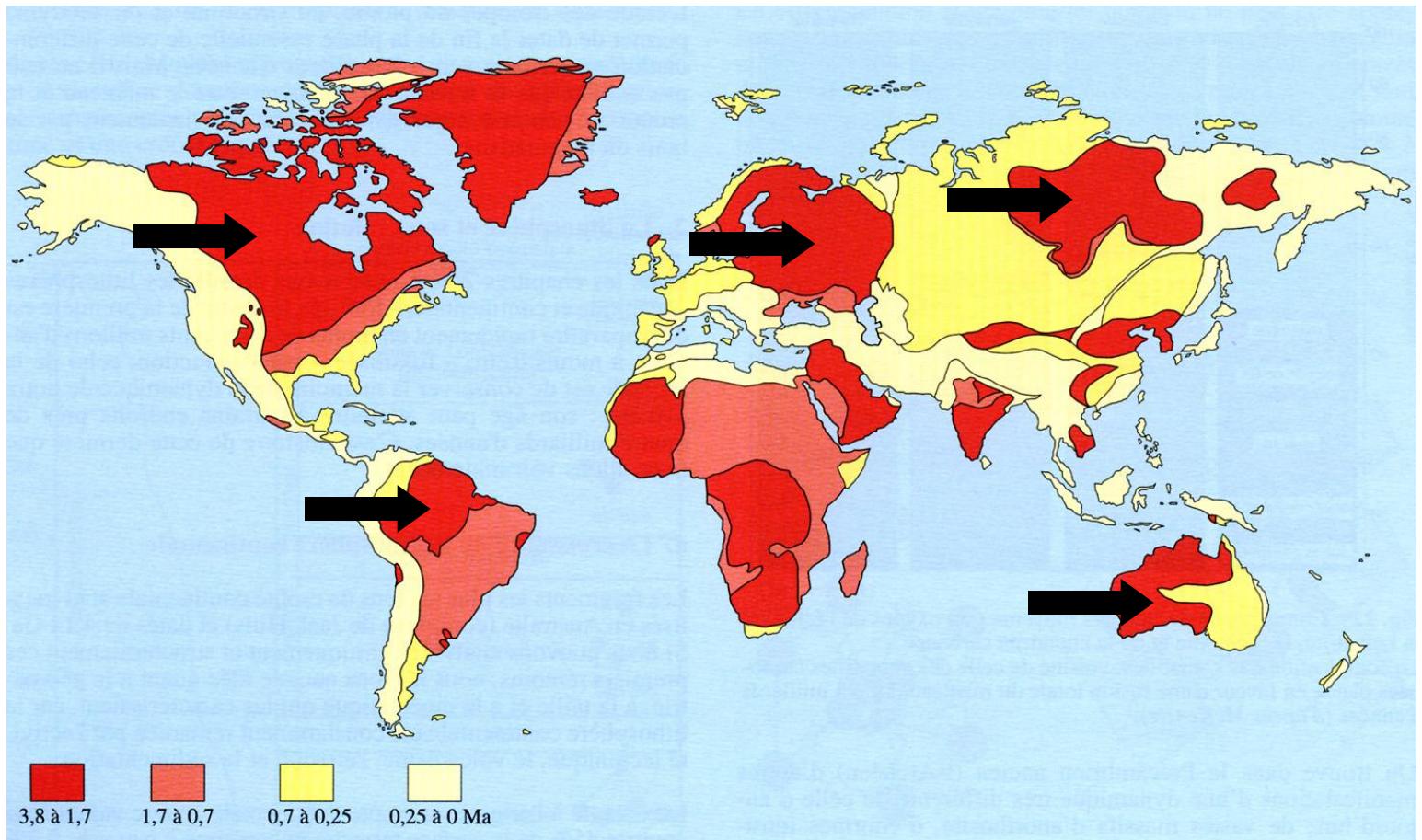
Dorénavant, c'est l'hydratation des péridotites du manteau qui permet leur fusion partielle.

IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)

Phase importante de croissance continentale

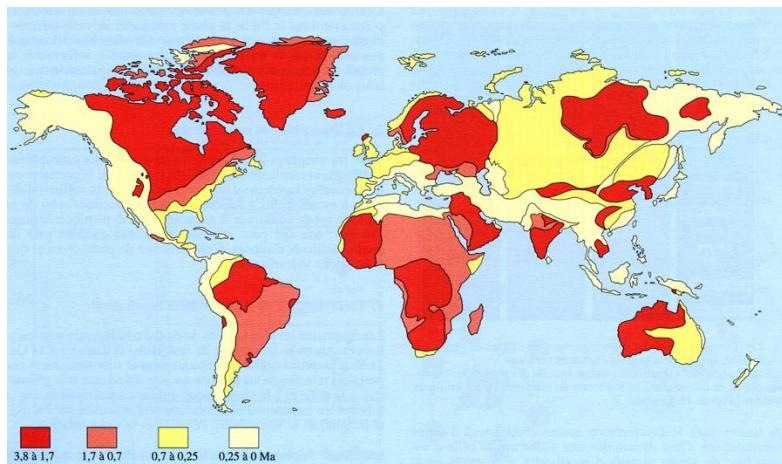


IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



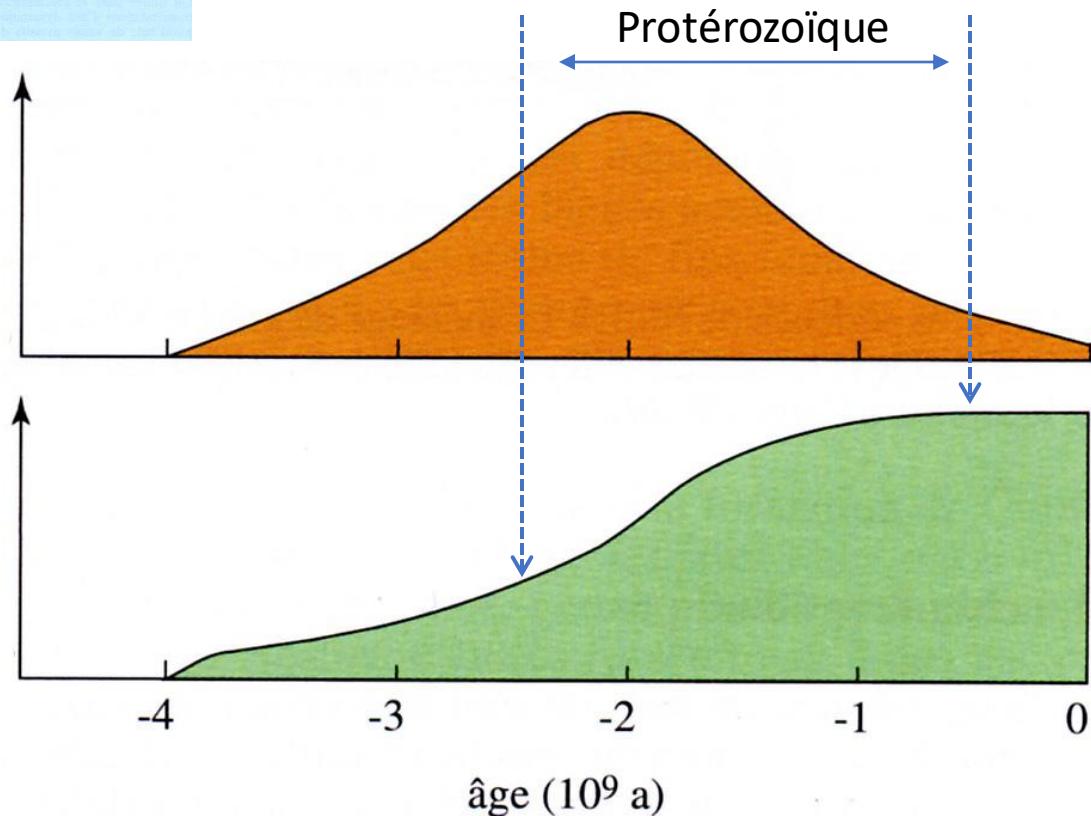
→ On trouve les roches les plus anciennes (**les cratons archéens**) au cœur des continents

IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



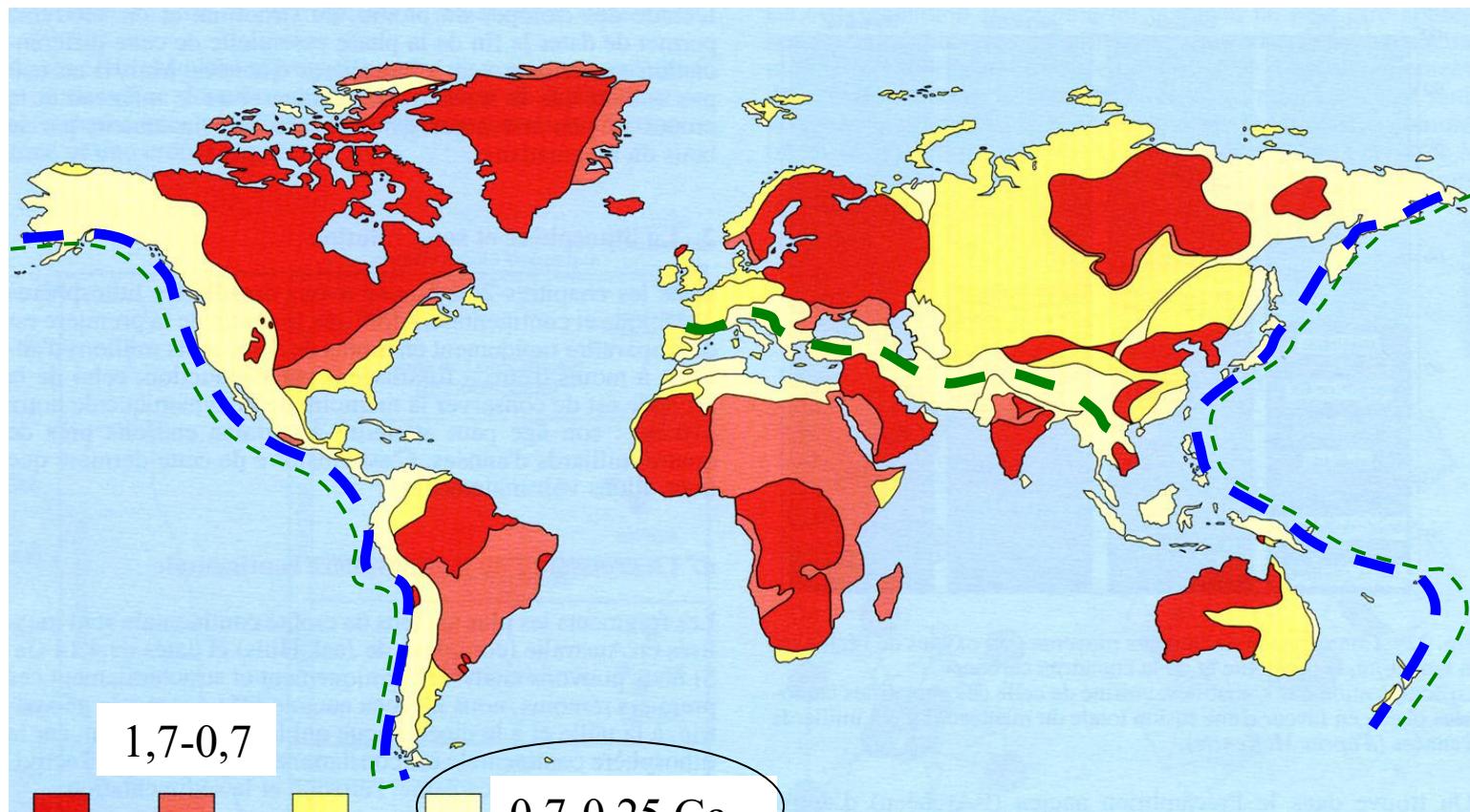
A la fin du Protérozoïque (540 Ma), l'essentiel des roches continentales est formé.

Production de croûte continentale



IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)

Depuis la fin du Protérozoïque: équilibre entre production et destruction de croûte continentale



Production — — — À l'aplomb des zones de subduction

Recyclage — — — Lors des collisions continentales

— - - Les subductions enfouissent des sédiments dans le manteau

V. Evolution de l'atmosphère terrestre depuis sa formation



ATMOSPHERE PRIMITIVE

$\text{CO}_2 = 19 \%$

$\text{N}_2 \sim 1\%$

$\text{H}_2\text{O} = 80 \% (\rightarrow \text{OCEAN})$

en 4 Ga



ATMOSPHERE ACTUELLE

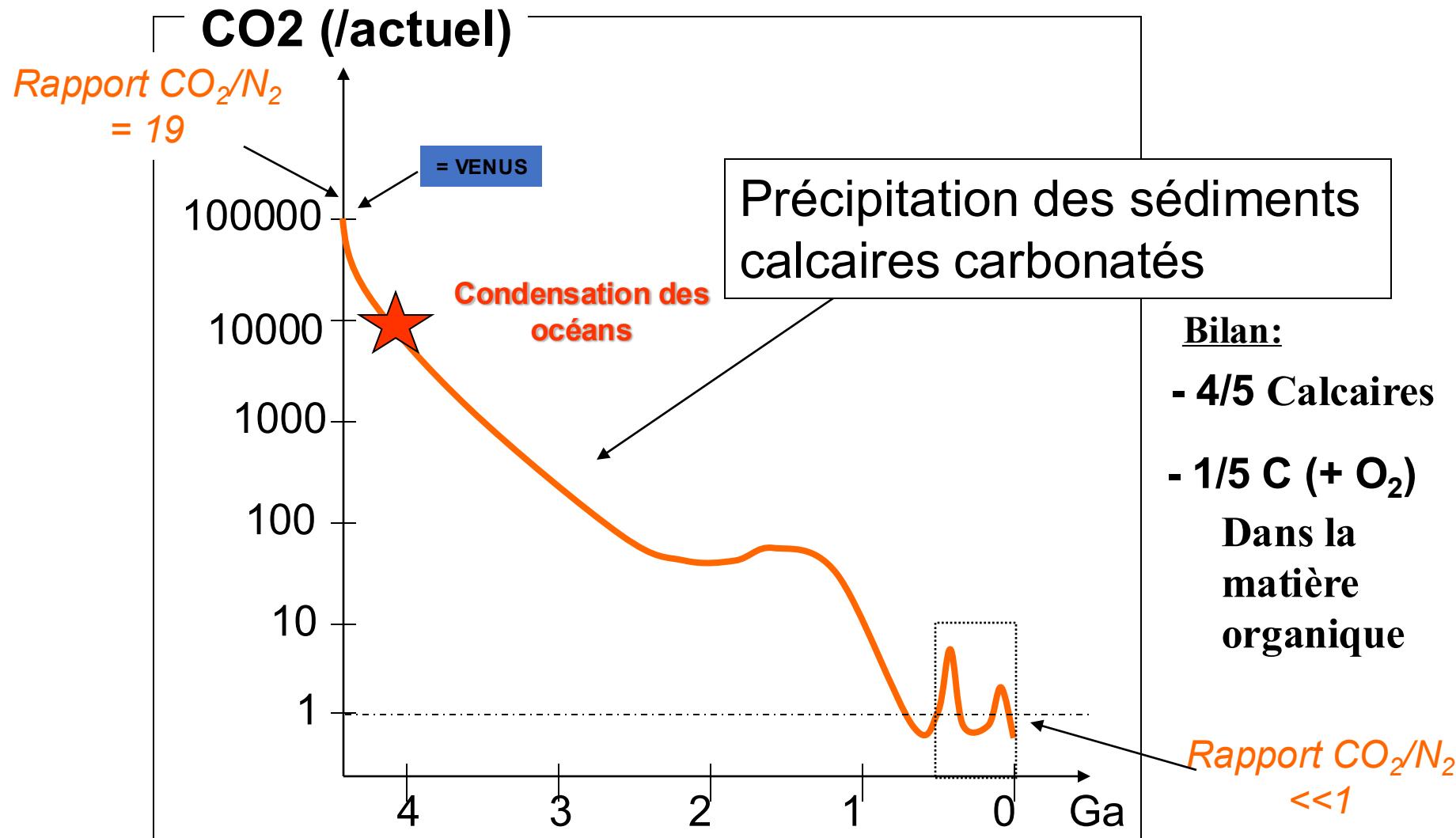
$\text{CO}_2 = 0.04\%$

$\text{N}_2 = 78.1 \%$

$\text{O}_2 = 20.9 \%$

Mécanismes mis en jeu ?

Evolution du CO₂ dans l'atmosphère terrestre



Mécanismes mis en jeu

1) Dissolution du CO₂ atmosphérique



Le CO₂ est transféré vers l' hydrosphère sous forme HCO₃⁻



Mécanismes mis en jeu

1) Dissolution du CO₂ atmosphérique



Le CO₂ est transféré vers l' hydrosphère sous forme HCO₃⁻

2) Altération des roches (exemple des **silicates calciques**)



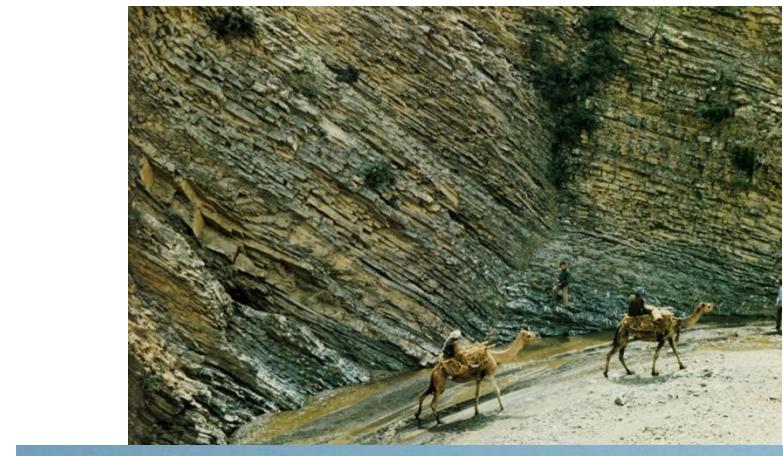
3) Transfert vers la mer

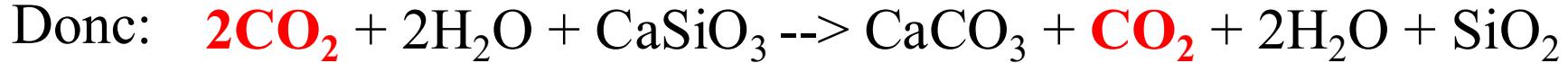
Mécanismes mis en jeu

4) sédimentation: formation des **carbonates**



Lorsque un organisme marin (ou corail) fabrique son test, il prélève 2 moles de HCO_3^- de l'hydrosphère pour donner une mole de CaCO_3 (calcite) et une mole de CO_2

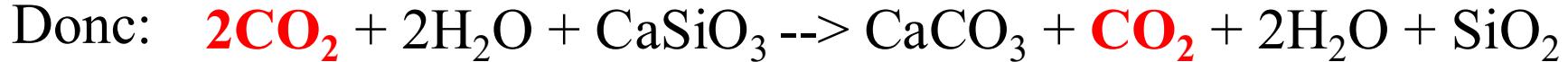




Bilan: 2 Co₂ consommés et un seul rejeté

Le CO₂ atmosphérique s' est donc transformé en CO₂ lithosphérique (calcaire) au cours des milliards d' années.

Les variations aux grandes échelles de temps sont dues à la compétition entre l' altération continentale (qui pompe du CO₂) et le volcanisme qui en fournit.



Bilan: 2 Co₂ consommés et un seul rejeté

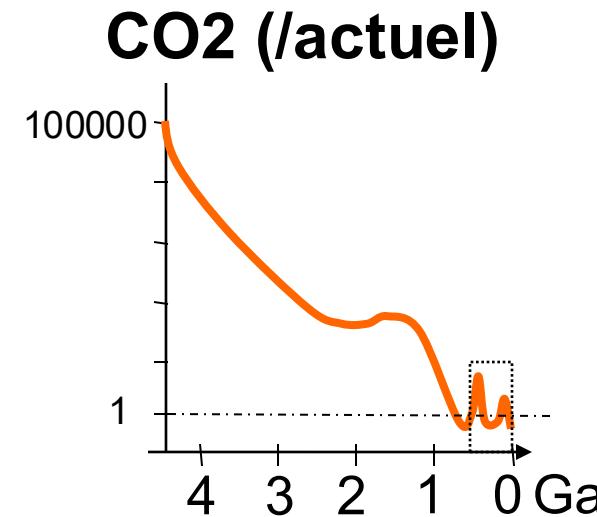
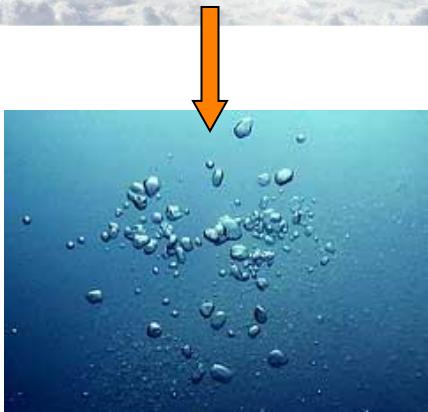
Le CO₂ atmosphérique s' est donc transformé en CO₂ lithosphérique (calcaire) au cours des milliards d' années.

Les variations aux grandes échelles de temps sont dues à la compétition entre l' altération continentale (qui pompe du CO₂) et le volcanisme qui en fournit.

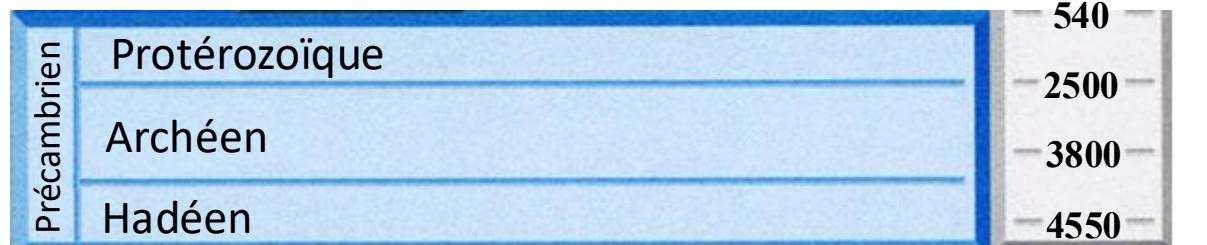
Au cours du temps, le taux de CO₂ a baissé d'un facteur 100 000; pression de CO₂ voisine de $30 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ juste après la formation de la Terre (avec P vapeur d'eau: $270 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), et de 40 Pa actuellement.



Le CO₂ atmosphérique s'est donc transformé en CO₂ lithosphérique (calcaire) en 4 milliards d'années.



VI. Les premières formes de vie



Jusqu'au milieu du XX^e siècle, on pensait que la vie n'avait existée que depuis l'Ere primaire (540 Ma)

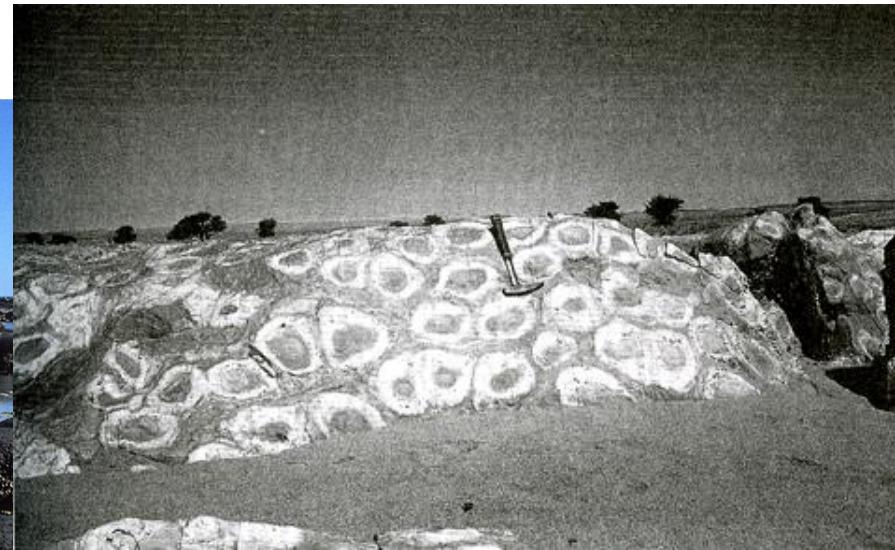
A l'Hadéen, on a très peu de roches conservées
-> peu d'information

A partir de l'Archéen, la vie se développe sous forme microscopique (bactéries)

La vie au précambrien : 1) êtres unicellulaires

Les **uniques organismes** présents **pendant** quelques **2 Ga** sont des **procaryotes** (*êtres unicellulaires; type bactéries et algues*).

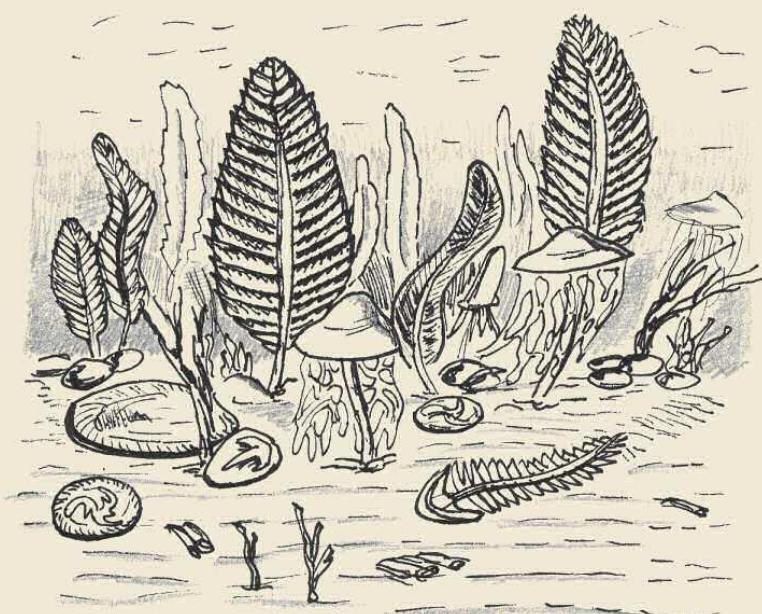
Des **stromatolithes** (*constructions carbonatées résultant de l'activité de cyanobactéries, algues unicellulaires*) sont datés pour les plus anciens à environ **3.5 Ga**



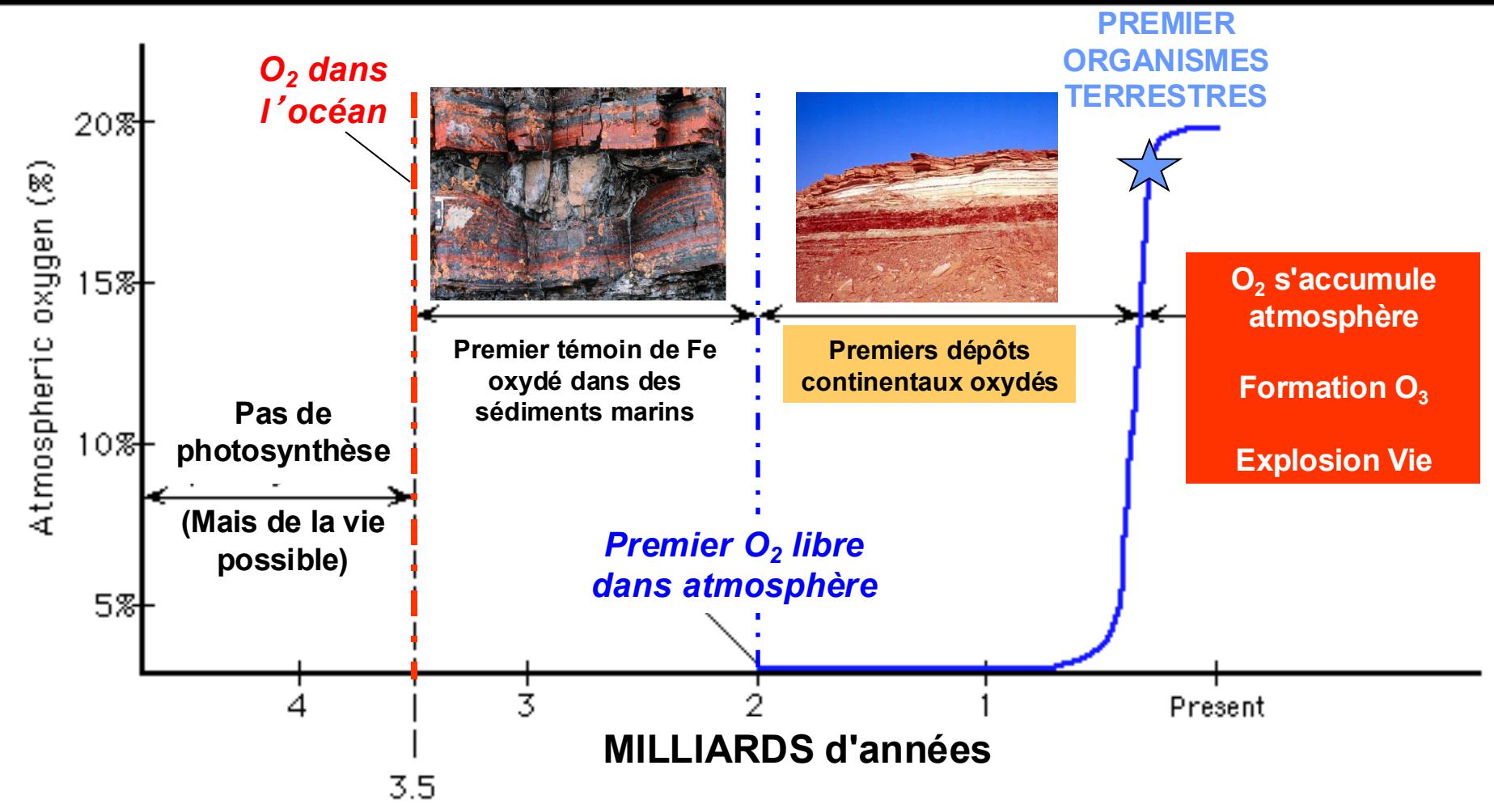
→ Production d' O_2 par photosynthèse

La vie au précambrien : 2) êtres pluricellulaires

Les organismes pluricellulaires ou **Eucaryotes** s' épanouissent vers 1000 Ma (1 Ga). Exemple avec les **faunes édiacariennes (Ediacara, Australie)** du précambrien terminal.



Evolution de O_2 dans l'atmosphère terrestre



Ce sont les organismes vivants qui produisent l' O_2 de l'atmosphère.
D'abord confiné dans les océans, il va ensuite s'accumuler dans l'atmosphère

Evolution de O₂ dans l'atmosphère terrestre

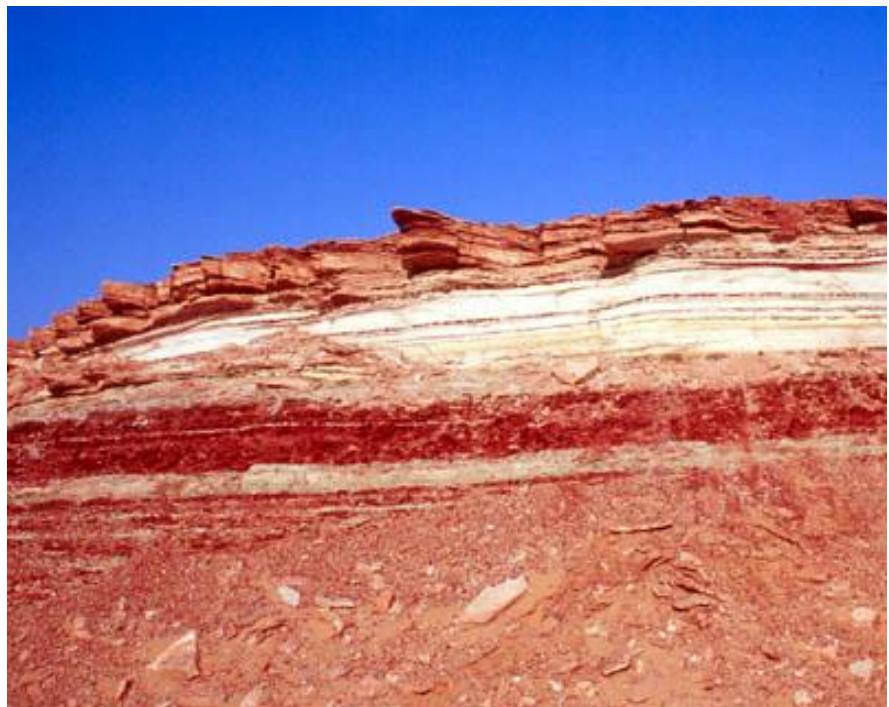
Vers 2 Ga

Dépôts marins



FER RUBANE
(Banded Iron Formation: BIF)

Dépôts continentaux



RED BEDS
(Séd. Détritiques)

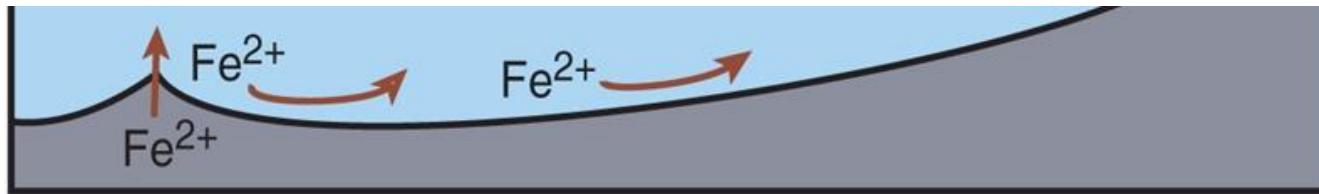
Formation des dépôts de fer rubané (BIF)

Ce sont les témoins de la présence d' O_2 dans les océans
(et ils représentent 80% de la production du fer mondial)



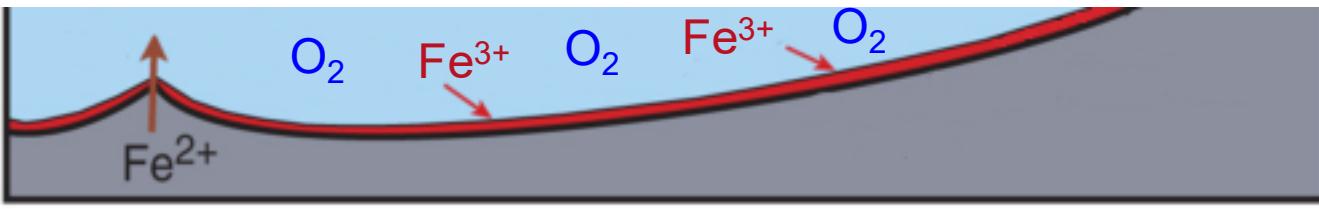
Formation des dépôts de fer rubané (BIF)

1)



Le fer réduit (Fe^{2+}) est soluble dans l'eau.

2)



En présence d' O_2 , le fer s'oxyde en Fe^{3+} . Il précipite pour former des dépôts de fer oxydé en consommant tout l' O_2 disponible.

3)

Le fer est à nouveau dissout car il n'y a plus assez d' O_2 disponible.
La sédimentation est « normale ».

4)

Dès que la quantité d' O_2 redevient suffisante, le fer est à nouveau oxydé, il précipite.

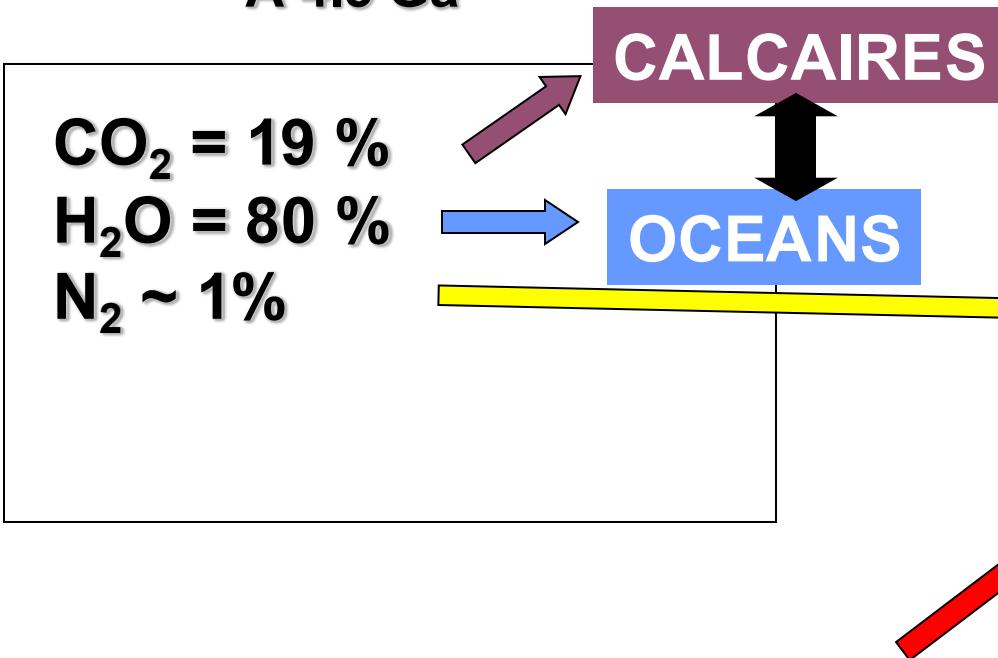


Photographie : Pierre Thomas

Evolution de l'atmosphère

ATMOSPHERE PRIMITIVE

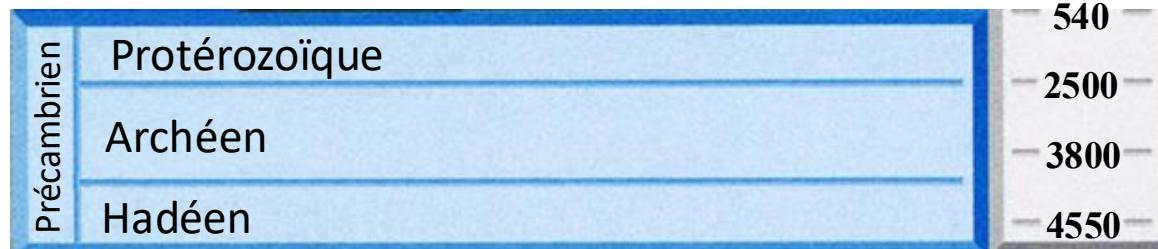
À 4.5 Ga



**Apparition de la vie
-> PHOTOSYNTHÈSE**

Deux gaz ont été importants dans l'évolution de l'atmosphère terrestre : CO_2 et O_2

VII. Le climat au Précambrien



1) Hadéen: Climat très chaud

Chaleur interne très élevée

2) Archéen

Activité « faible du soleil », mais atmosphère riche en CO₂ : **climat chaud**

Ce phénomène est amplifié par:

- le taux de vapeur d'eau important car la surface océanique est grande
- CO₂ non piégé par l'altération des silicates car la surface continentale est faible

VII. Le climat au Précambrien

3) Protérozoïque

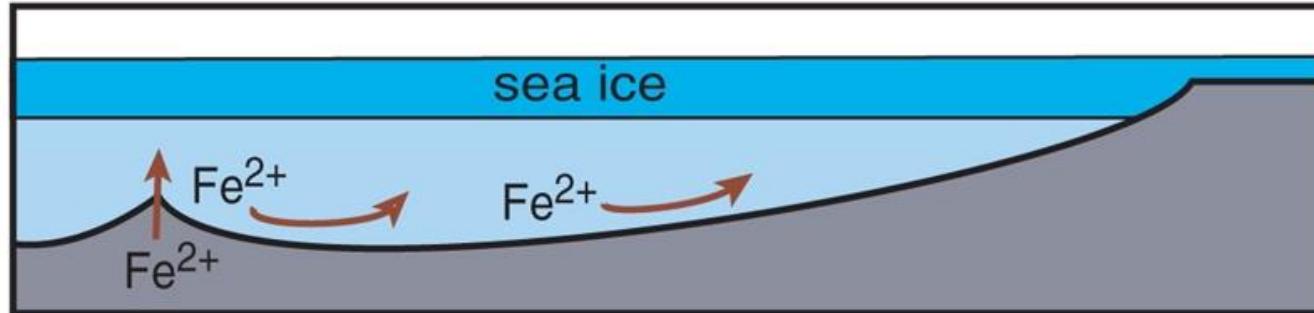
Premiers puits à CO₂: carbonates de calcium (CaCO₃) précipités par le développement des stromatolithes
Croissance continentale: premiers méga-continents

-> **Apparition des premières glaciations (2,3 Ga, et entre 0,9 et 0,6 Ga)**

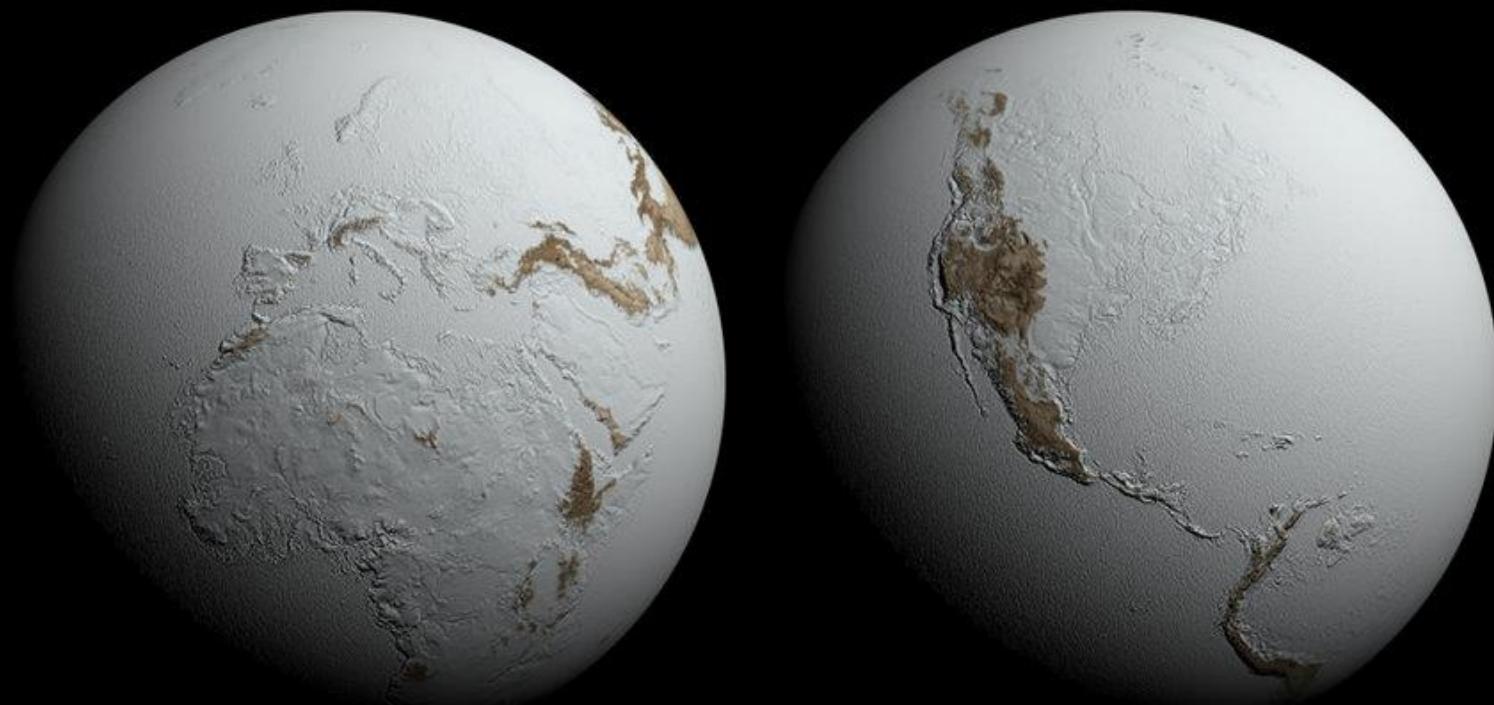
À ~2 Ga, quand l'O₂ envahit l'atmosphère, il va oxyder le méthane et ainsi réduire encore l'effet de serre de l'époque. Le soleil ne fournit encore que 85% de son énergie actuelle.

-> **Glaciation:** la température moyenne de surface est ~ -10°C

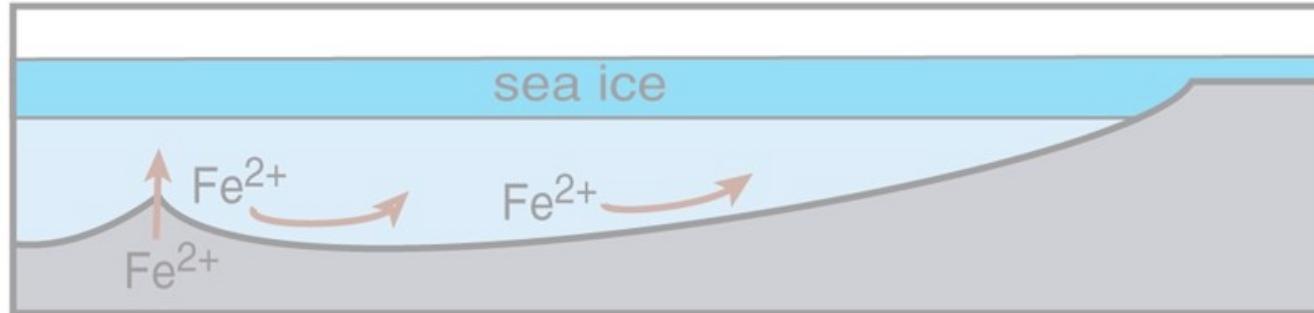
Les grandes glaciations : Terre « boule de neige »



l'océan devient appauvri en O_2
(*car l' O_2 est principalement dans l'atmosphère*)

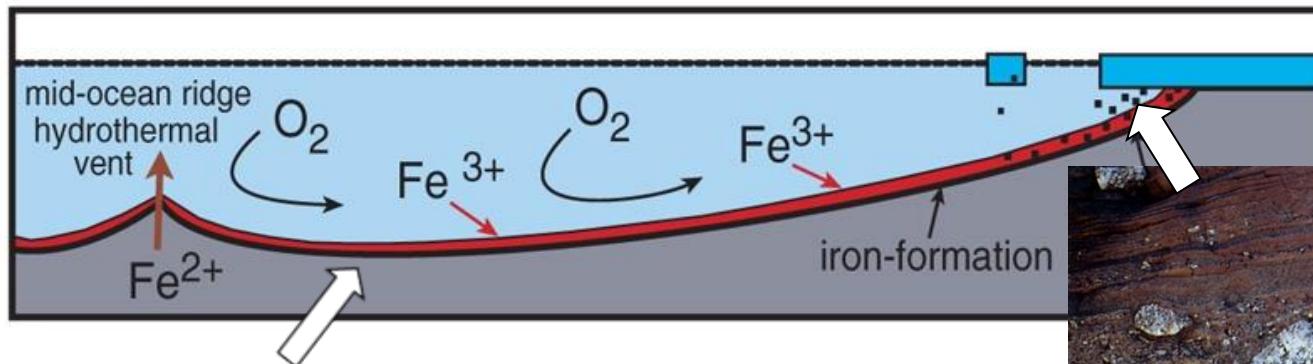


Les grandes glaciations : Terre « boule de neige »

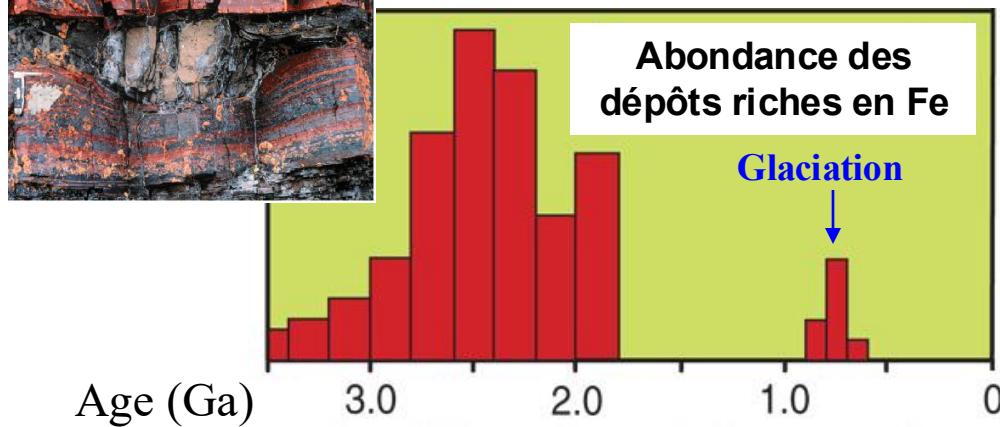


l'océan devient appauvri en O_2

à la fonte des glaces: ventilation des océans

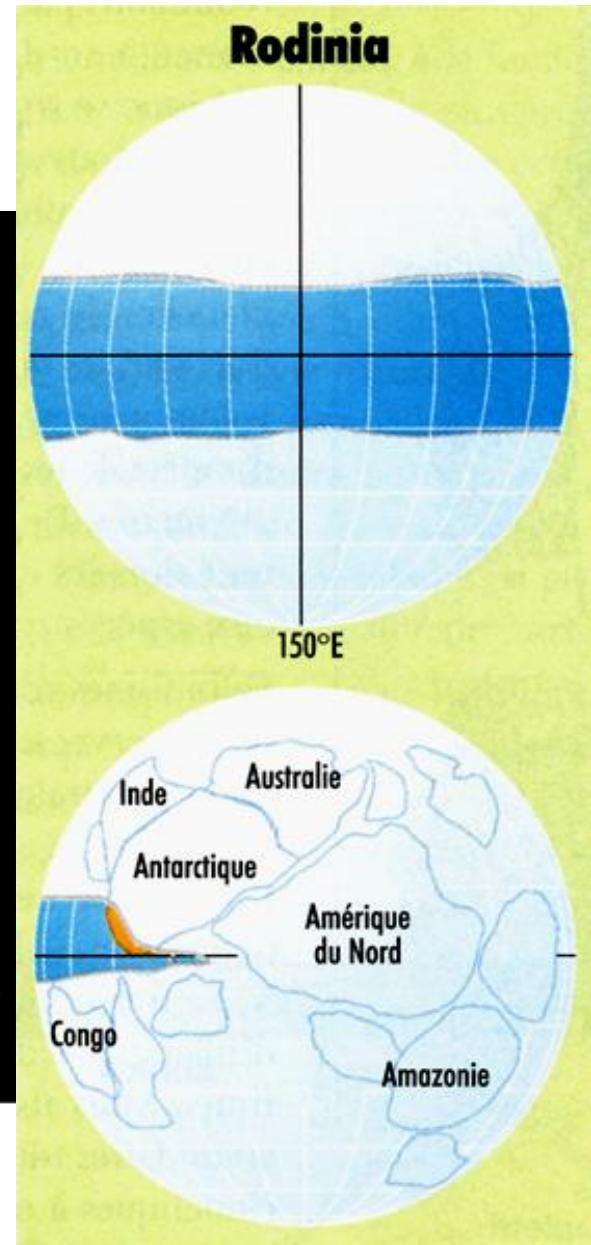
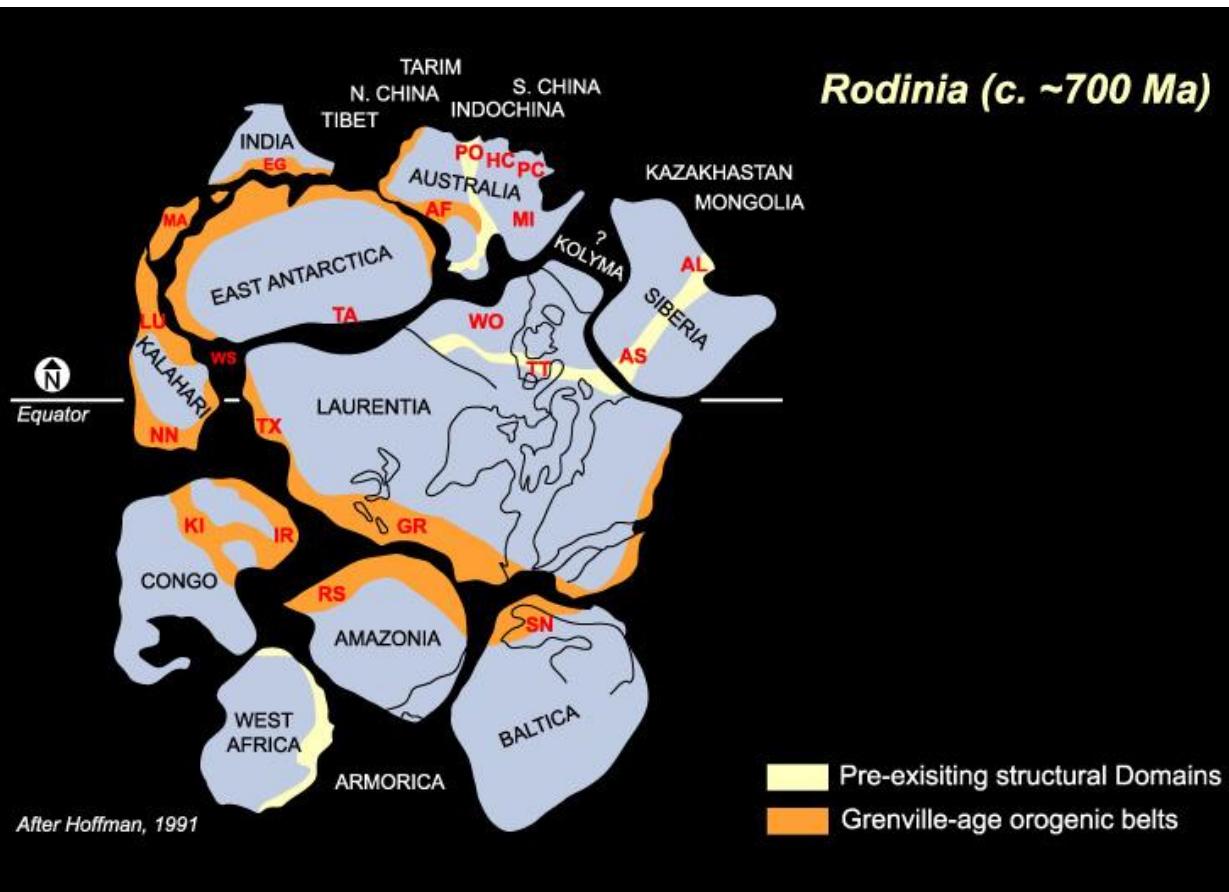


Tillites

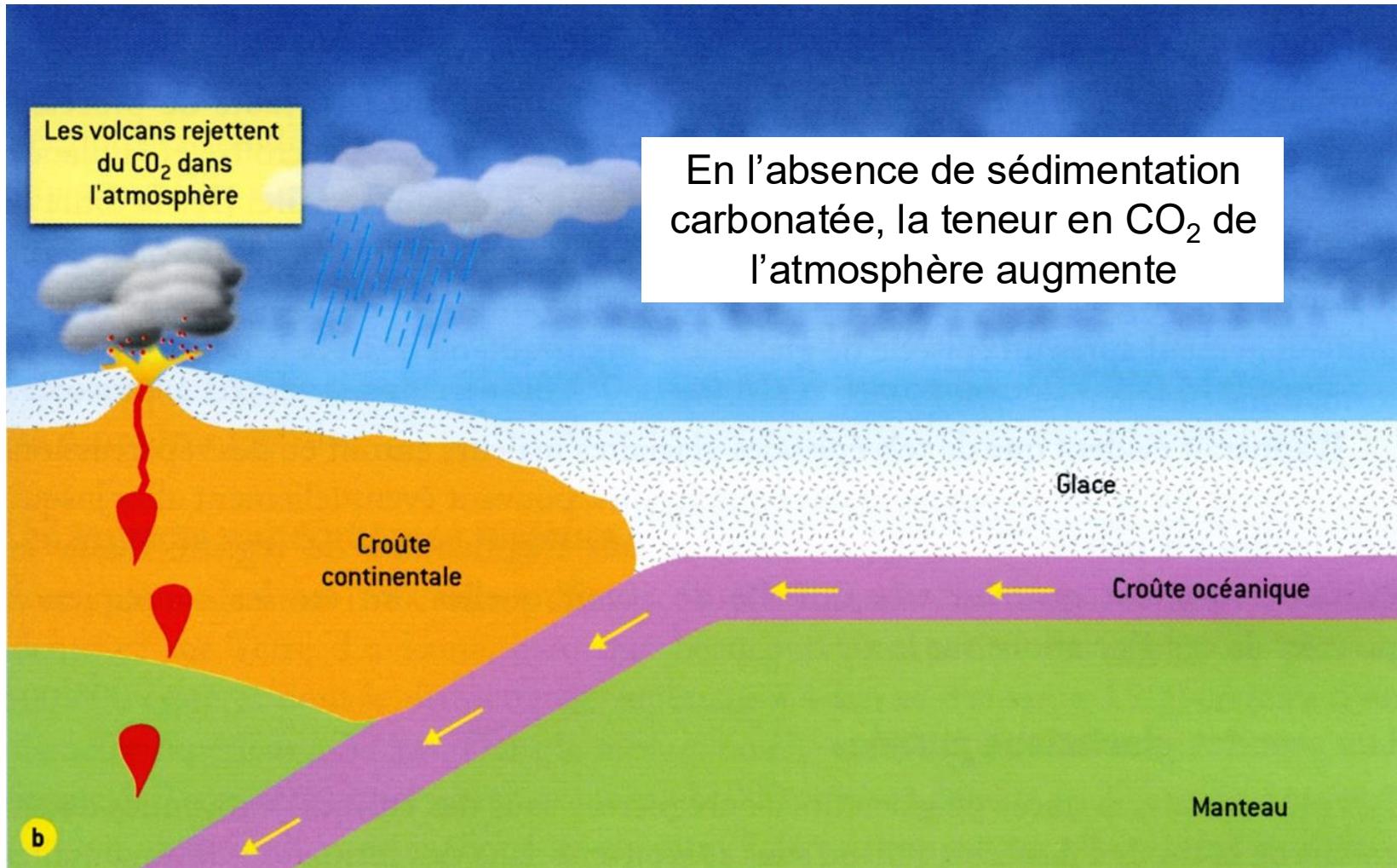


La glaciation de 700-750 Ma

Tous les continents sont regroupés autour de l'équateur en un seul: La Rodinia



Comment sortir d'une Terre enneigée ?



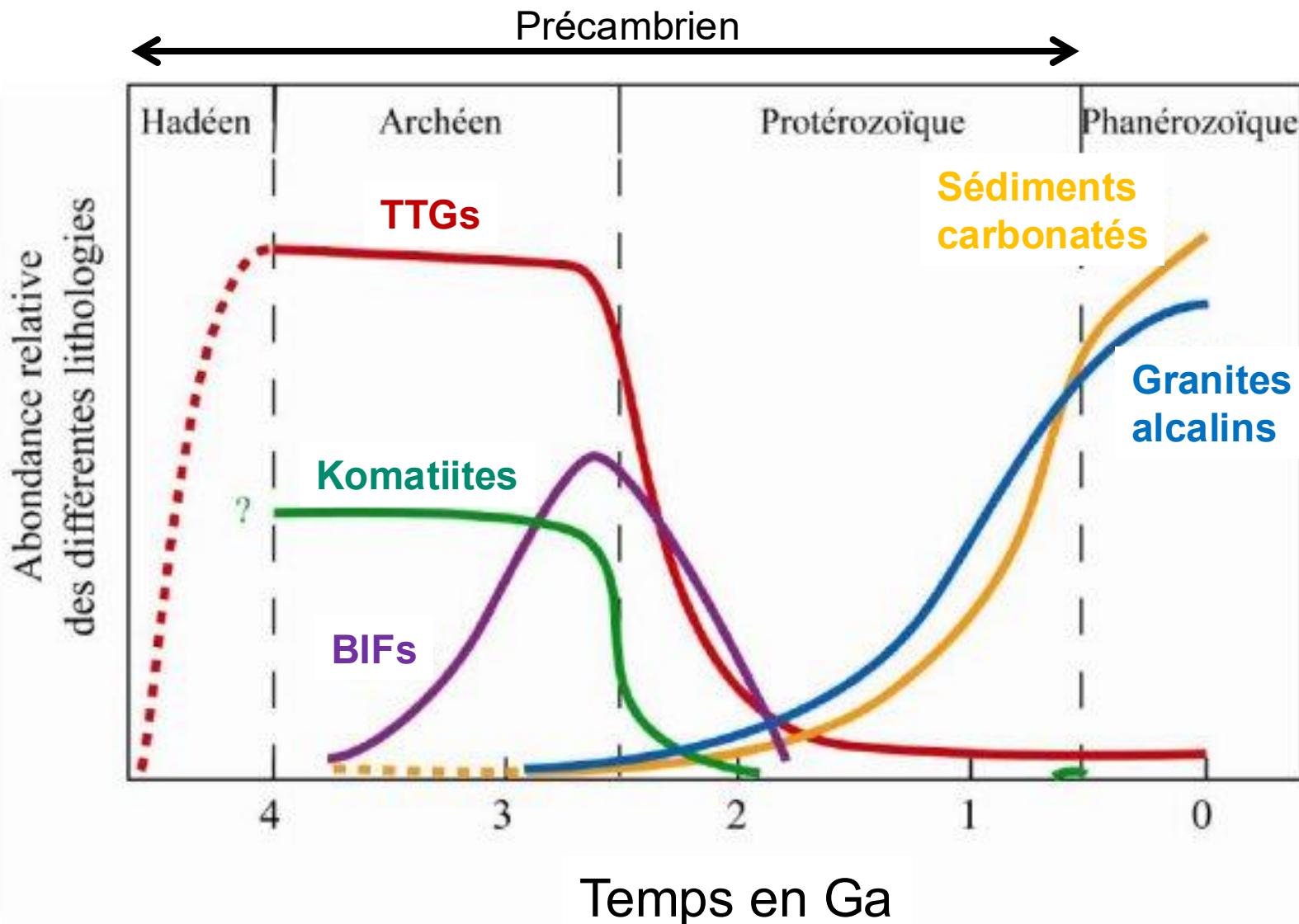
CO₂, effet de serre
et T augmentent



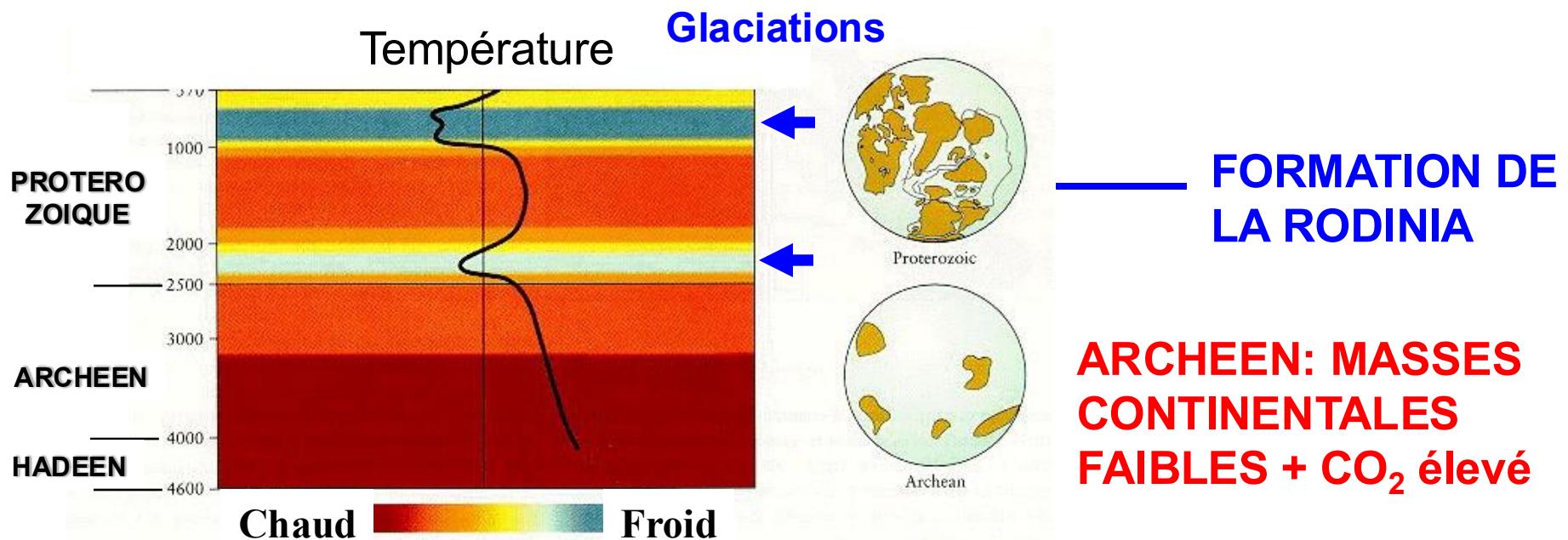
fonte des glaces

VIII. Synthèse

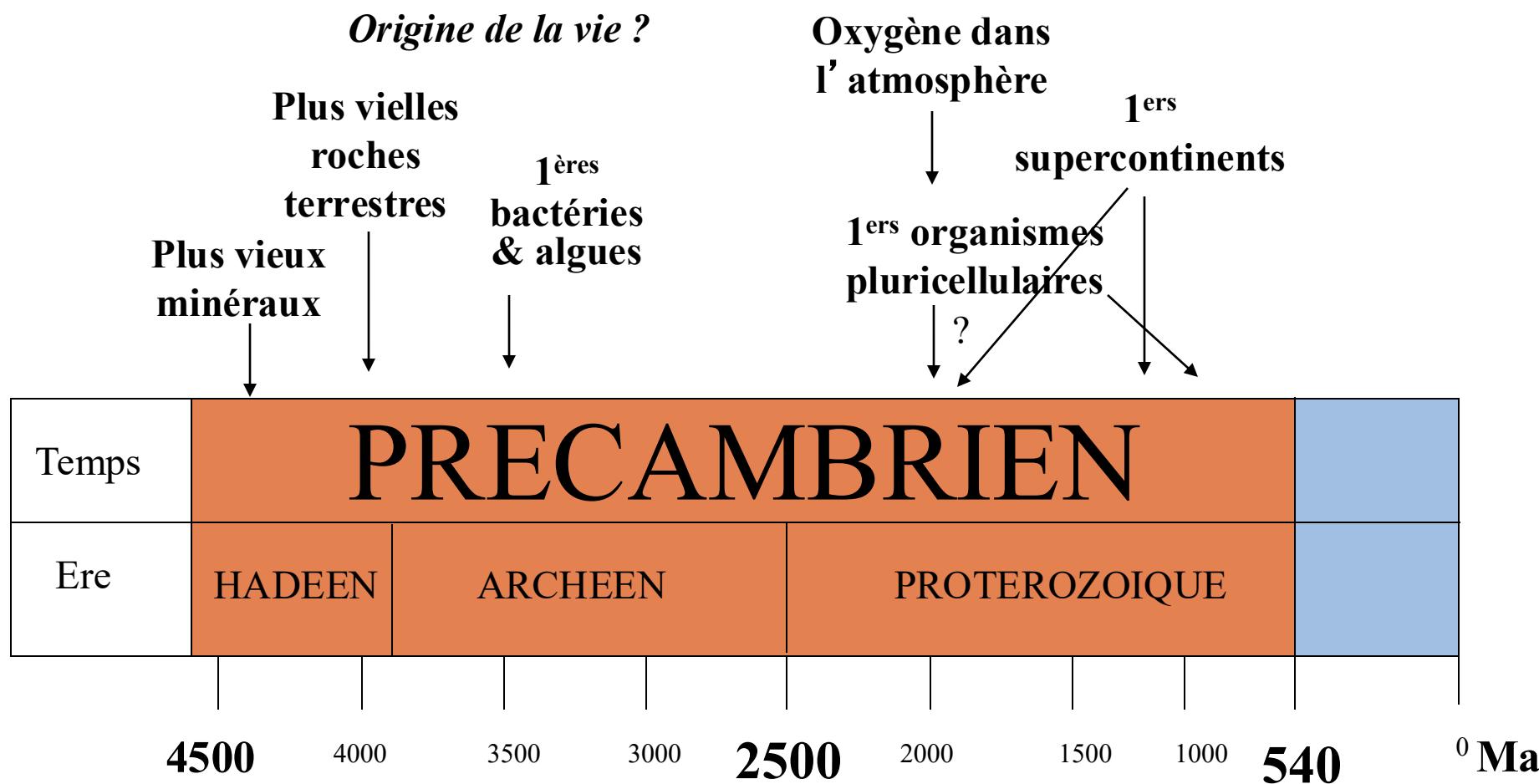
Abondance relative des différents types de roches



Evolution du climat au pré-Cambrien



VIII. Synthèse



L'atmosphère s'enrichit en oxygène à mesure que les organismes photosynthétiques deviennent plus nombreux, plus actifs et que l'évolution vers des formes de vie plus complexe s'accélère.