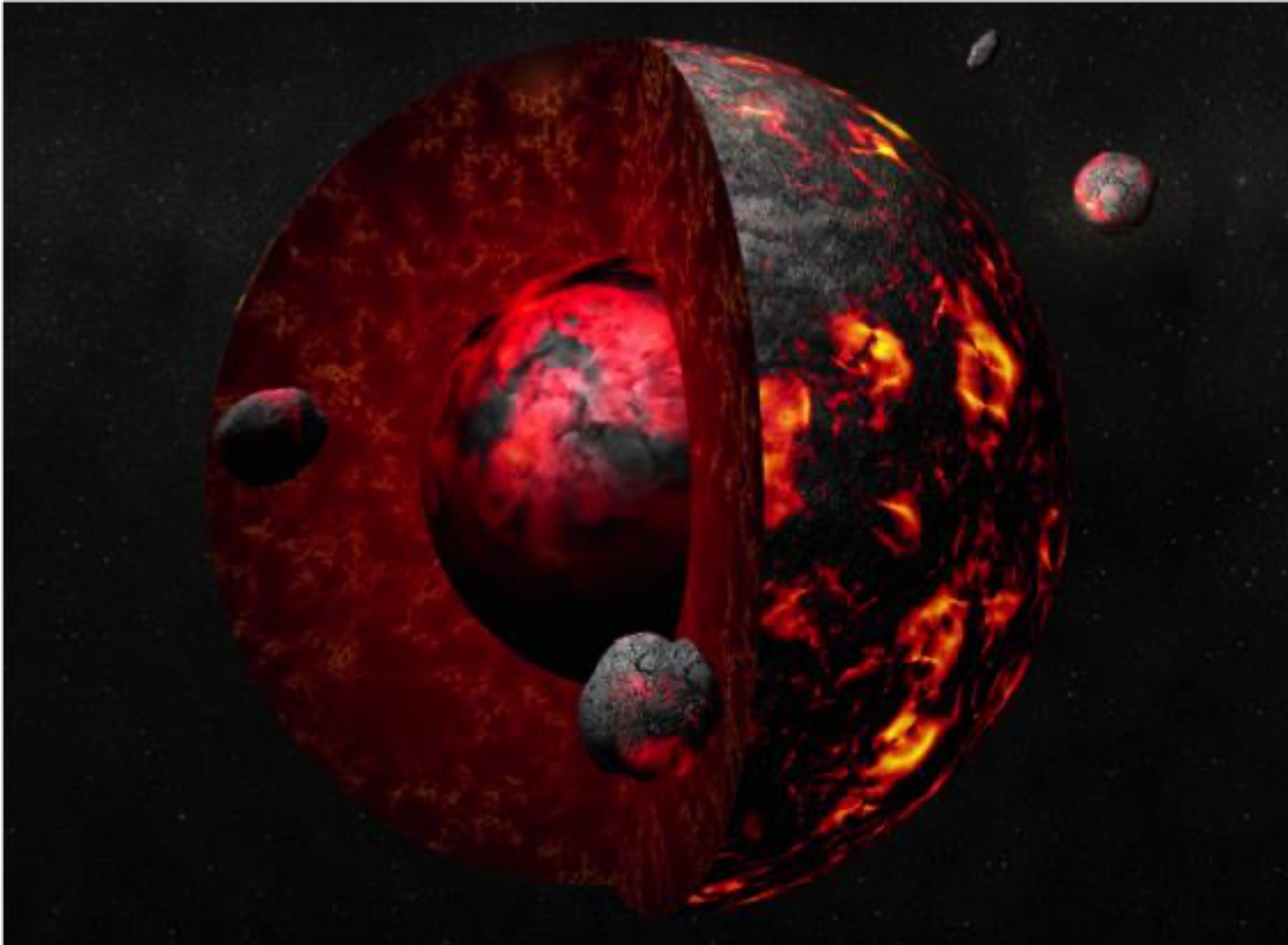


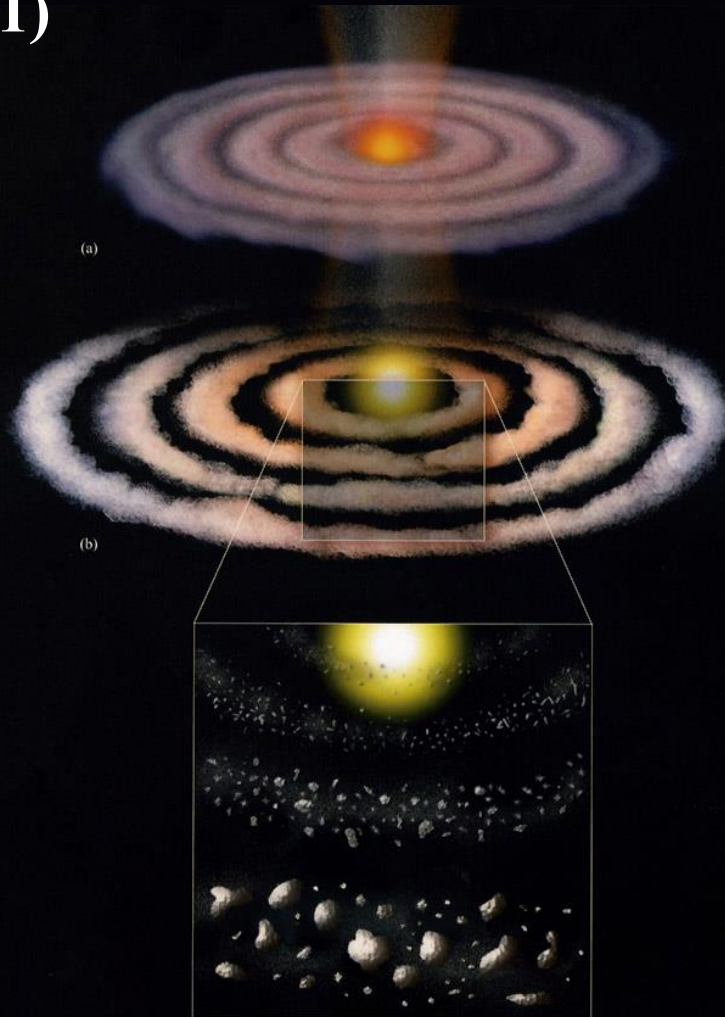
Le Précambrien



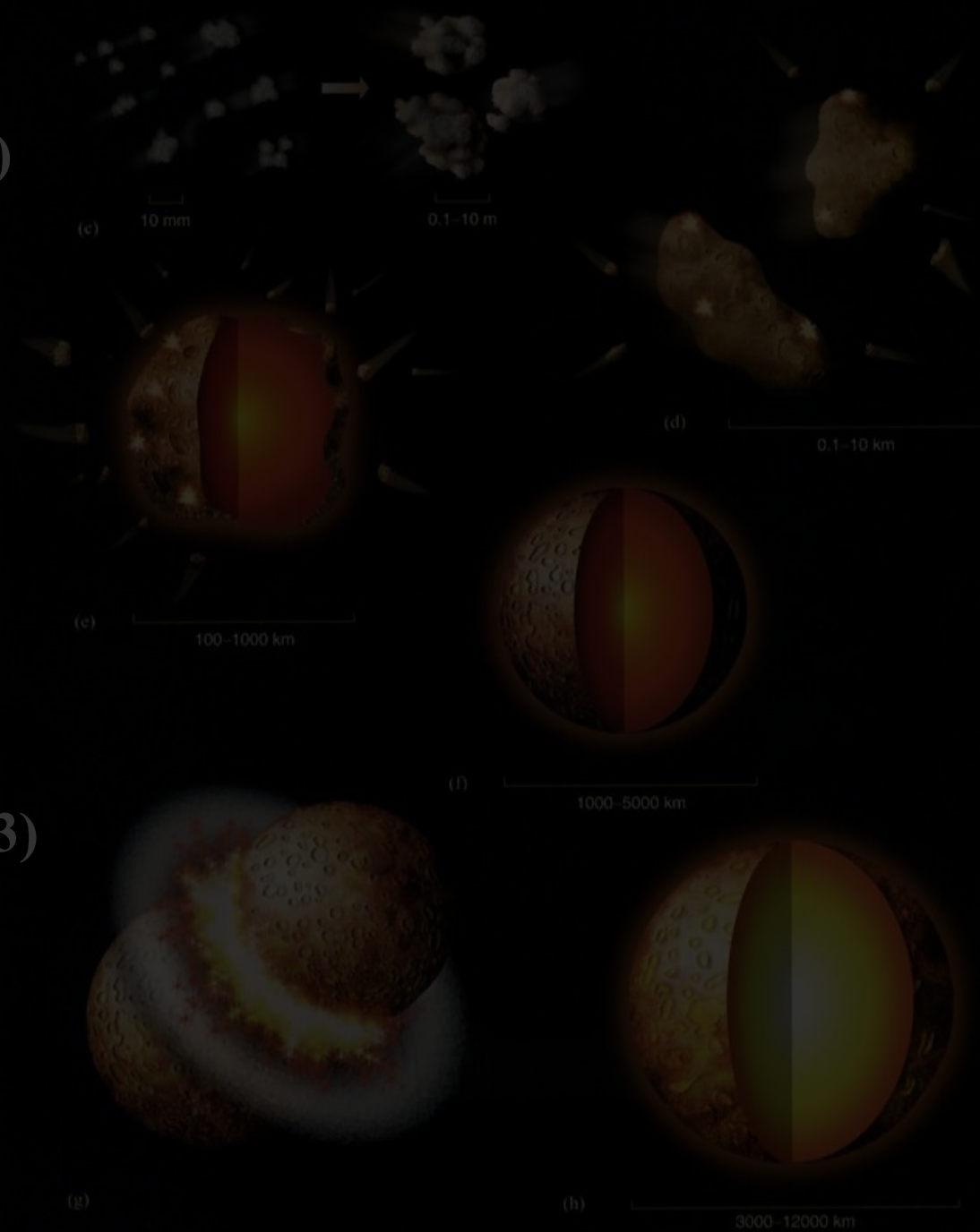
- I. Préambule
- II. L'Hadéen (4,55 – 4 Ga)
- III. L'Archéen (4 – 2,5 Ga)
- IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)
- V. Evolution de l'atmosphère terrestre depuis sa formation
- VI. Les premières formes de vie
- VII. Le climat au Précambrien
- VIII. Synthèse

Formation de la Terre *en résumé*

1)

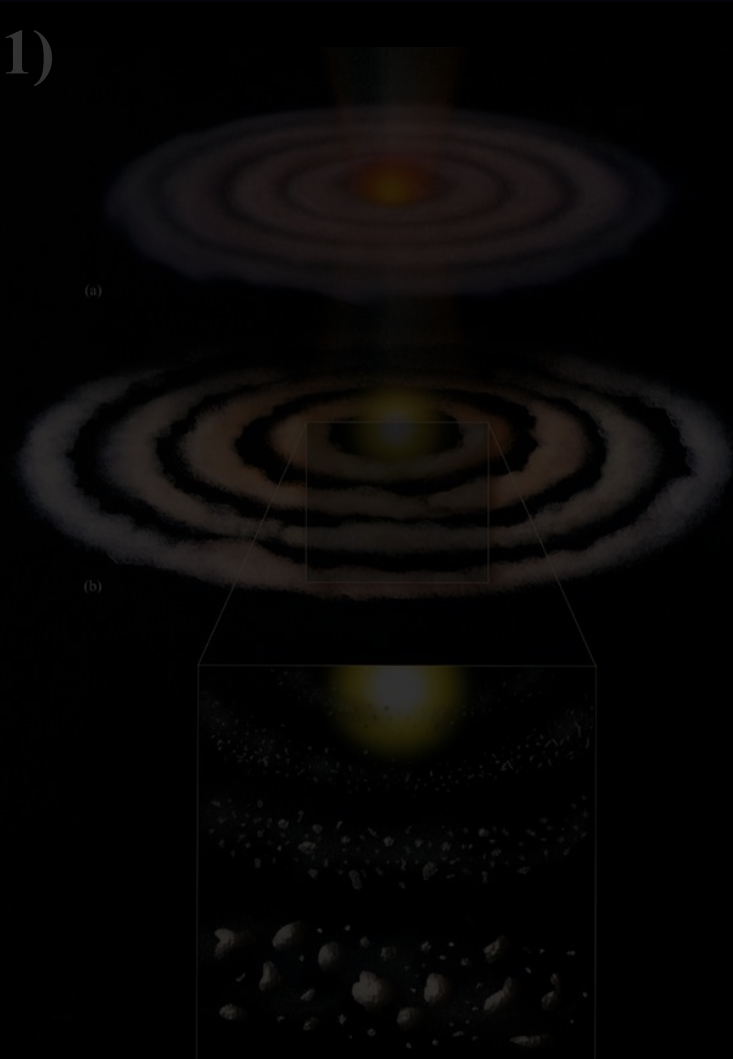


2)

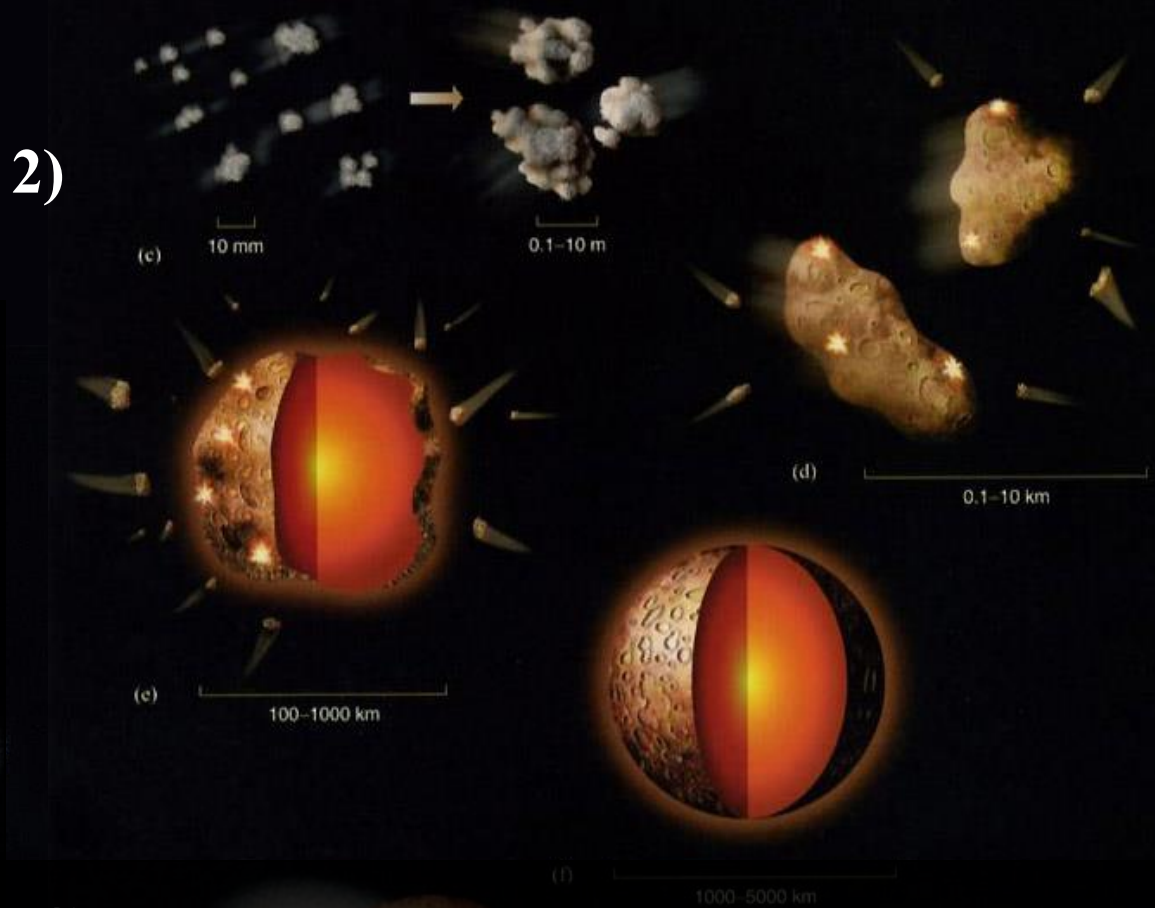


Formation de la Terre *en résumé* 2)

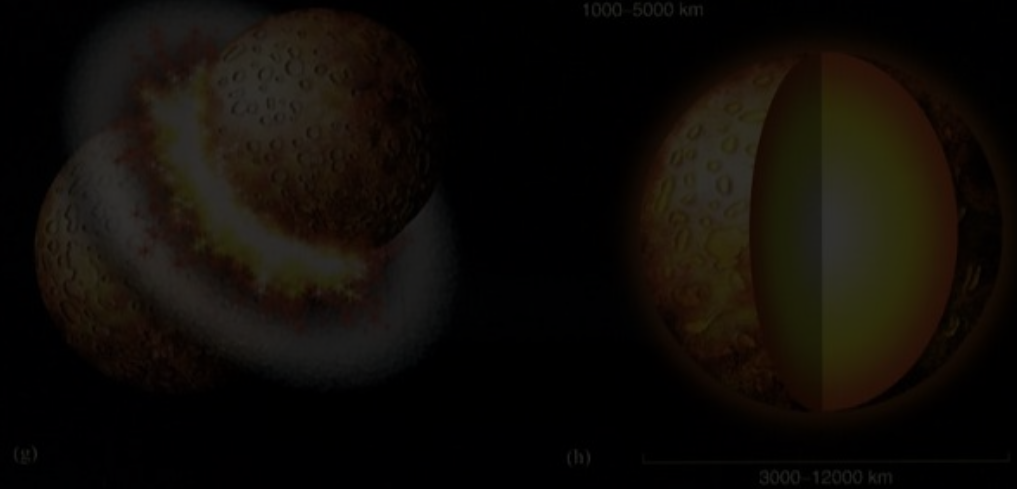
1)



2)



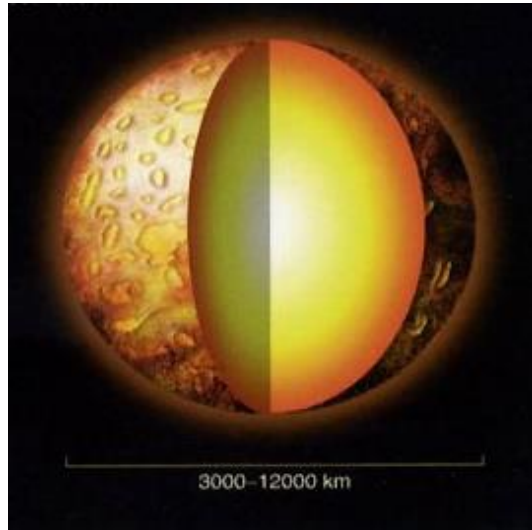
3)



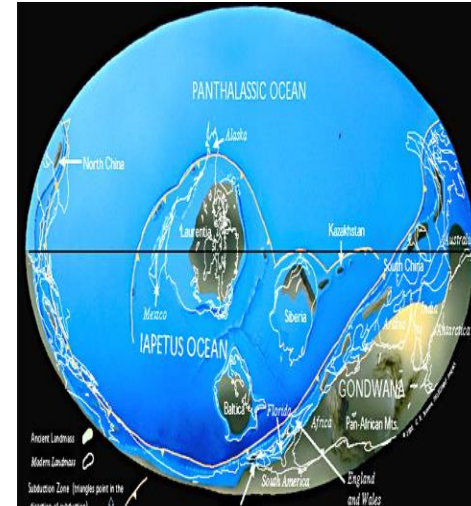
I. Préambule

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



| Éon | Ère | Système | Série | Age (Ma) |
|---------------|-------------------------|-------------|-------------|----------|
| Phanérozoïque | Cénozoïque | Quaternaire | Holocène | 0.01 |
| | | | Pléistocène | 1.75 |
| | | Tertiaire | Pliocène | 5.3 |
| | | | Miocène | 23.5 |
| | | | Oligocène | 33.7 |
| | | | Eocène | 53 |
| | | | Paléocène | 65 |
| | Mésozoïque (Secondaire) | Crétacé | | 135 |
| | | Jurassique | | 203 |
| | | Trias | | 250 |
| | Paléozoïque (Primaire) | Permien | | 295 |
| | | Carbonifère | | 355 |
| | | Dévonien | | 410 |
| | | Silurien | | 435 |
| | | Ordovicien | | 500 |
| | | Cambrien | | 540 |
| Précambrien | Protérozoïque | | | 2500 |
| | Archéen | | | 3800 |
| | Hadéen | | | 4550 |

I. Préambule

I. Précambrien

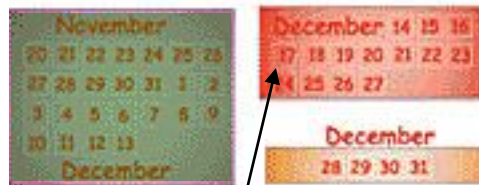
01/01 - 19/11



II. Phanérozoïque

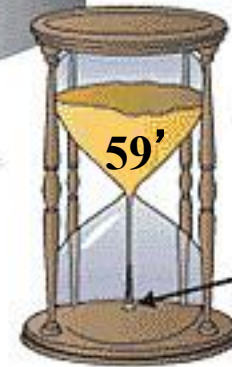
Paléozoïque →

20/11 - 12/12



Mésozoïque
13/12 - 27/12

Cénozoïque
28/12 - 31/12

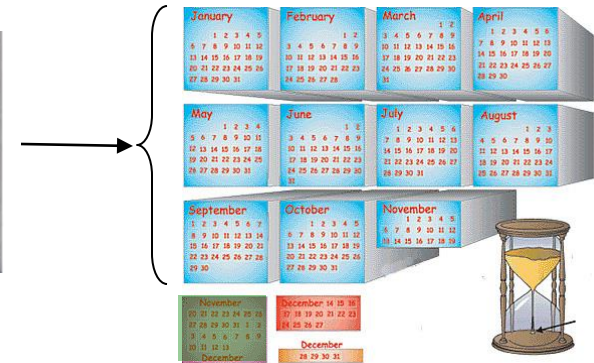
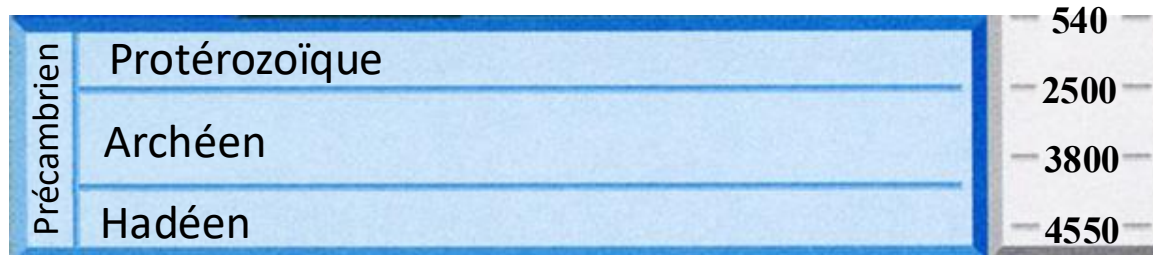


Dernière
heure du
31/12

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

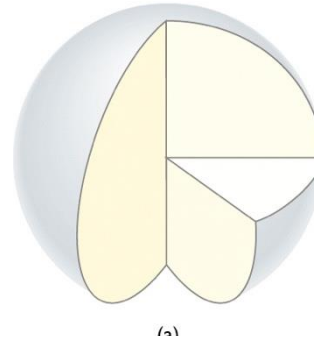
*Les éléments lourds migrent vers le **noyau**.*



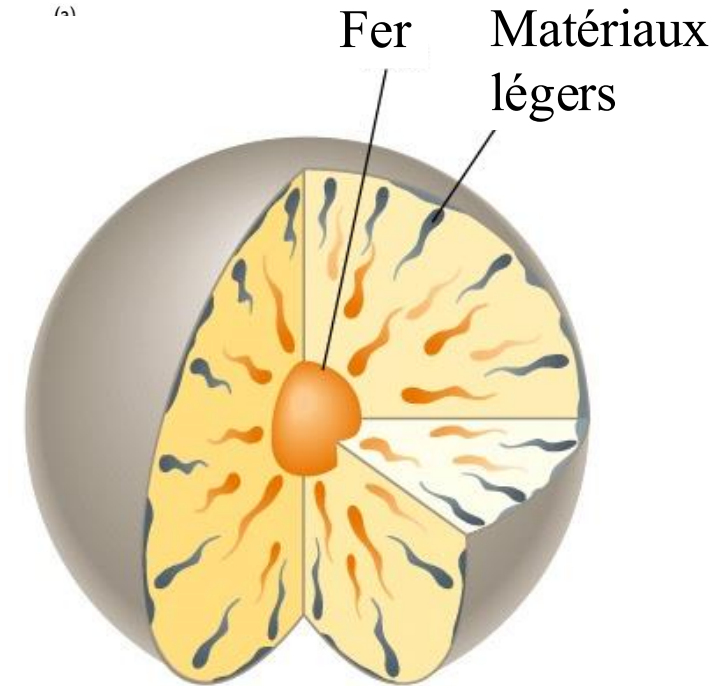
Condition pour la naissance du champ magnétique

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

*Les autres constituent le **manteau**.*



(a)



(b)

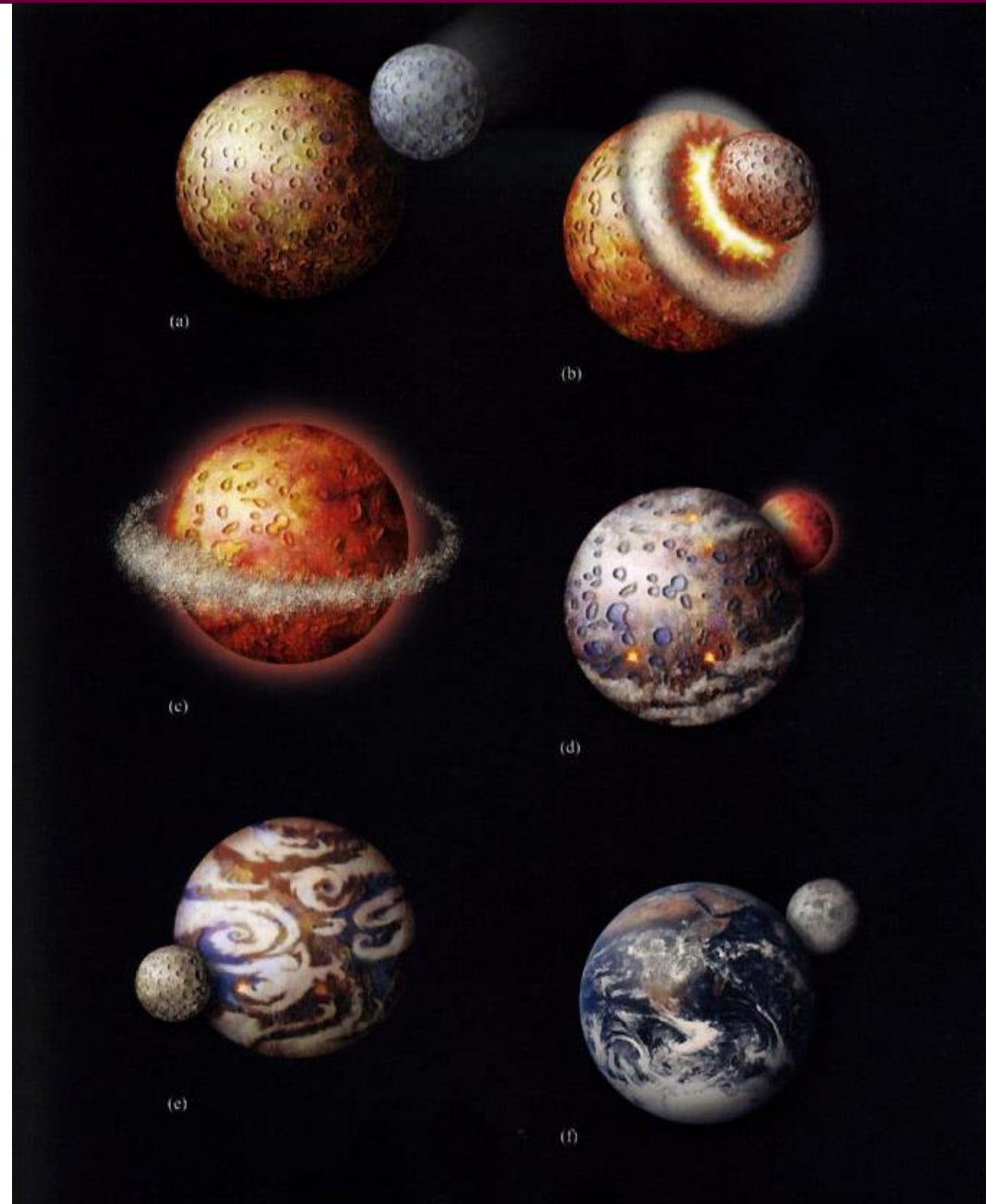
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

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**.

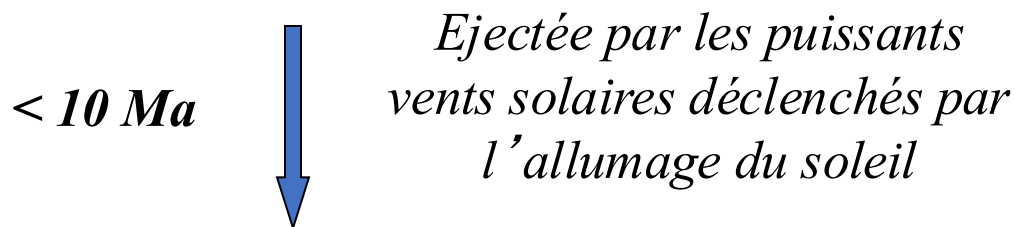


La Lune est composée de matériaux extrait du manteau terrestre et de l'impacteur



4) Origine de l'atmosphère terrestre


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



Atmosphère **primitive** (secondaire)

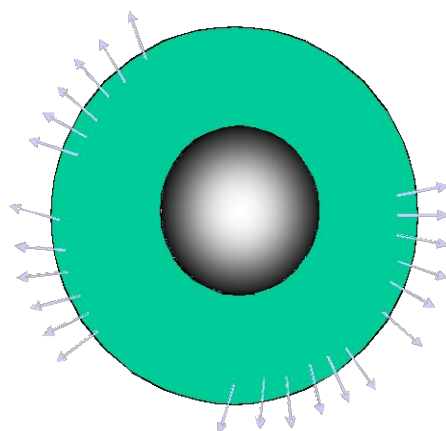
- Source interne ***qq 10 Ma***

DEGAZAGE DU MANTEAU
(via magmatisme, différenciation)

 CO_2 , N_2 , $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$

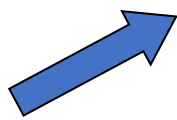
- Source externe

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



ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES

H₂ et He dans l'espace (trop léger)

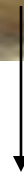


MERCURE

VENUS

TERRE

MARS



| Atmos. | aucune | Très dense | Dense | Très faible |
|------------|--------|-----------------|----------------|-----------------|
| Comp1 | | CO ₂ | N ₂ | CO ₂ |
| Comp2 | | N ₂ | O ₂ | N ₂ |
| Proportion | | 19/1 | 4/1 | 19/1 |

Aujourd'hui !

H₂O : glaces ?

ATMOSPHERE DES PLANETES TELLURIQUES

MERCURE



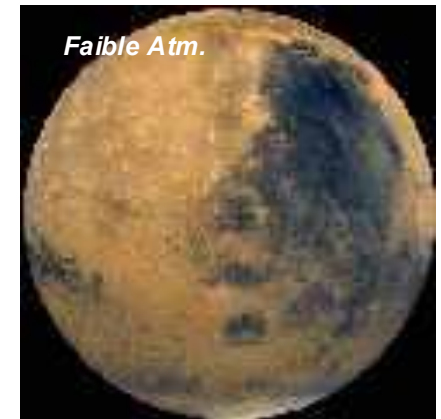
VENUS



TERRE



MARS

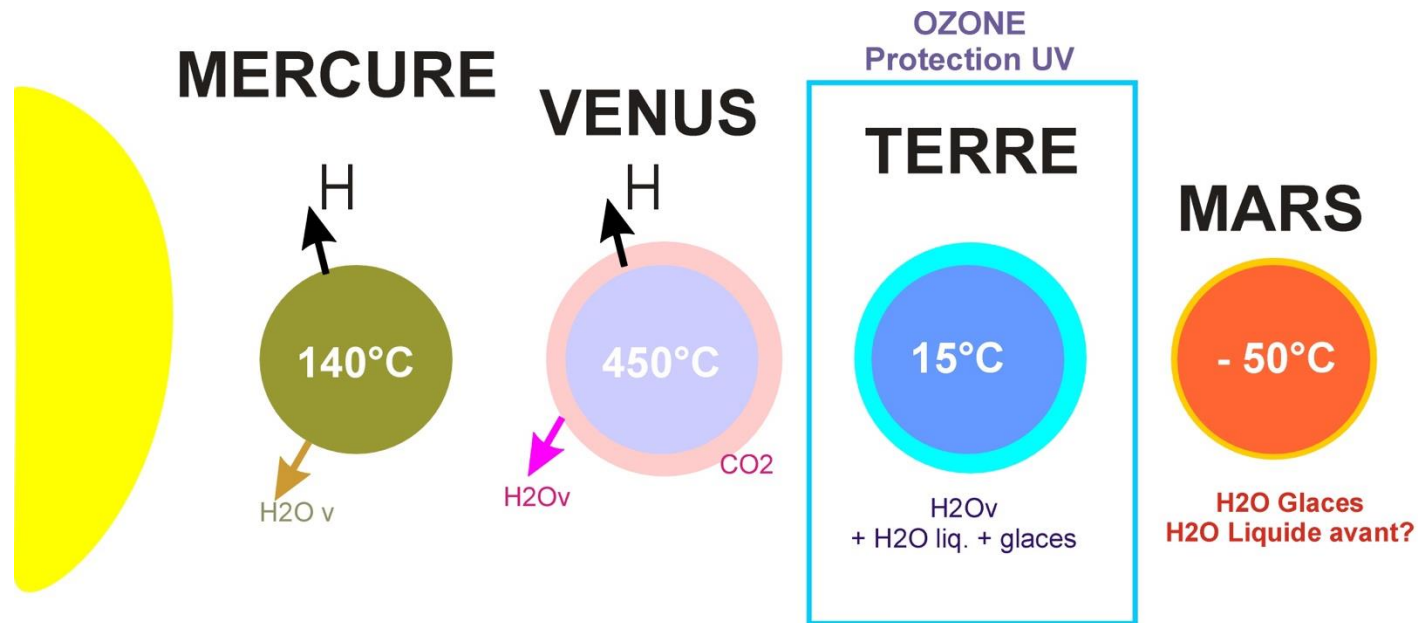


TOUTES CES PLANETES
avaient peu après la
formation du système
solaire des atmosphères
primitives similaires

CO₂ = 19 %
H₂O = 80 %
N₂ ~ 1%
H₂
He

5) Formation des océans

Condensation de la vapeur d'eau quand T suffisamment basse



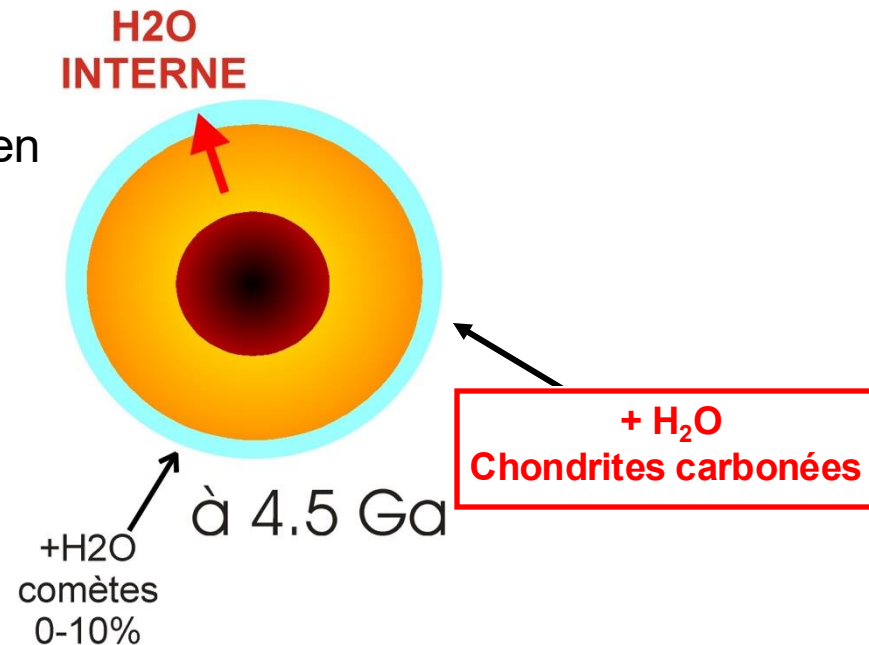
Mais d'où vient cette eau ?

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

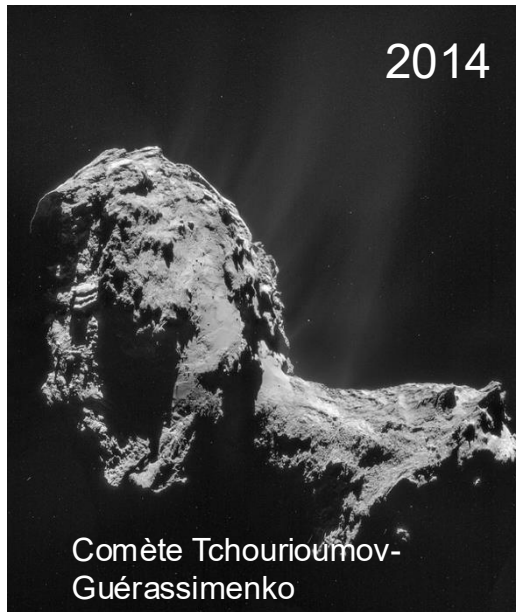


II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

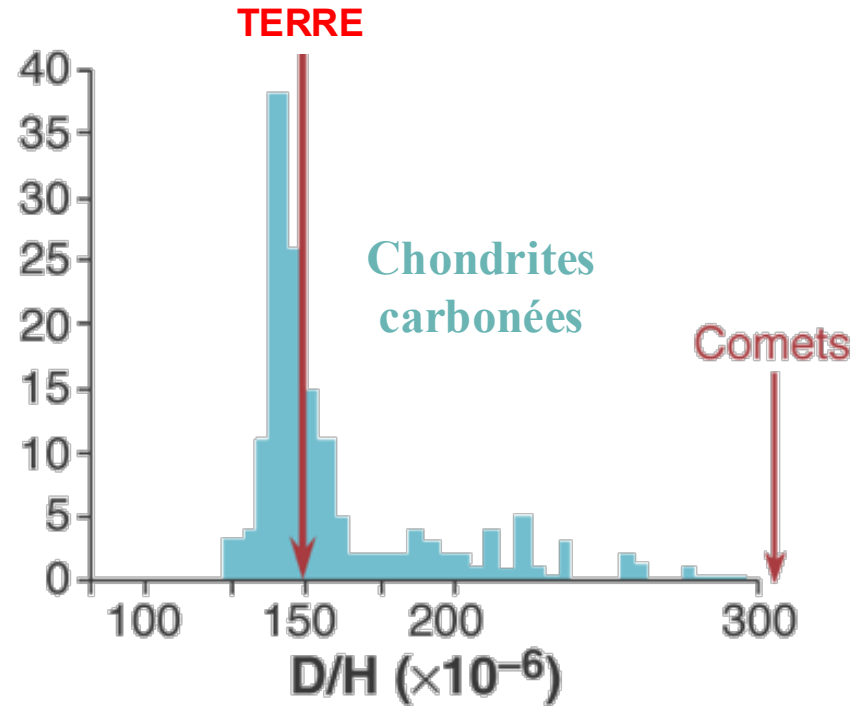
**La réponse est donnée
par le rapport D/H**

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)

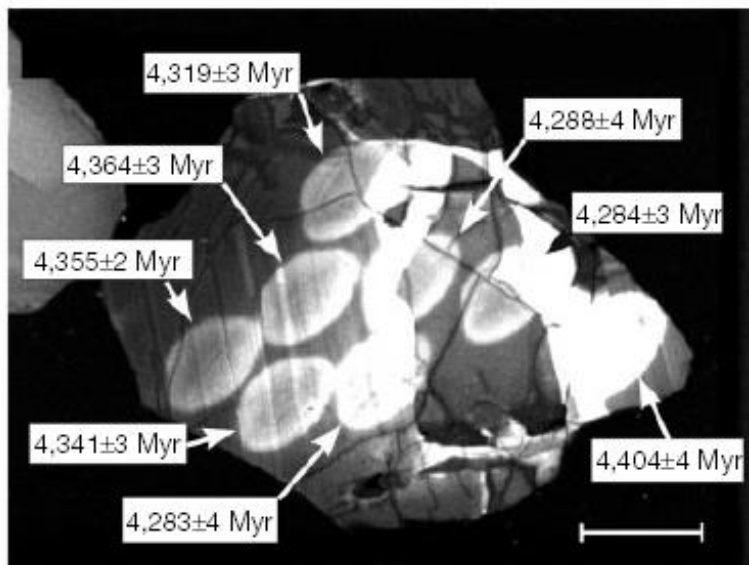
Mais depuis quand ?

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 ...**

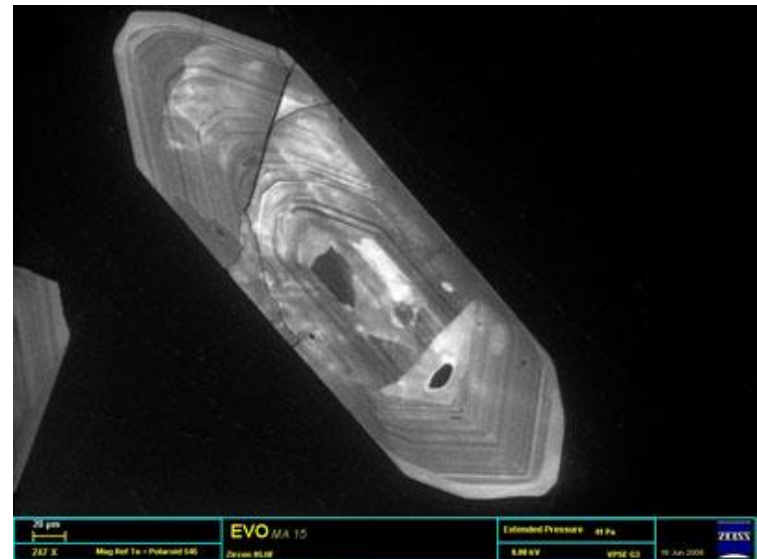
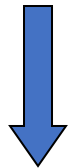
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

4,404 ± 0,008 Ga : \Rightarrow 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

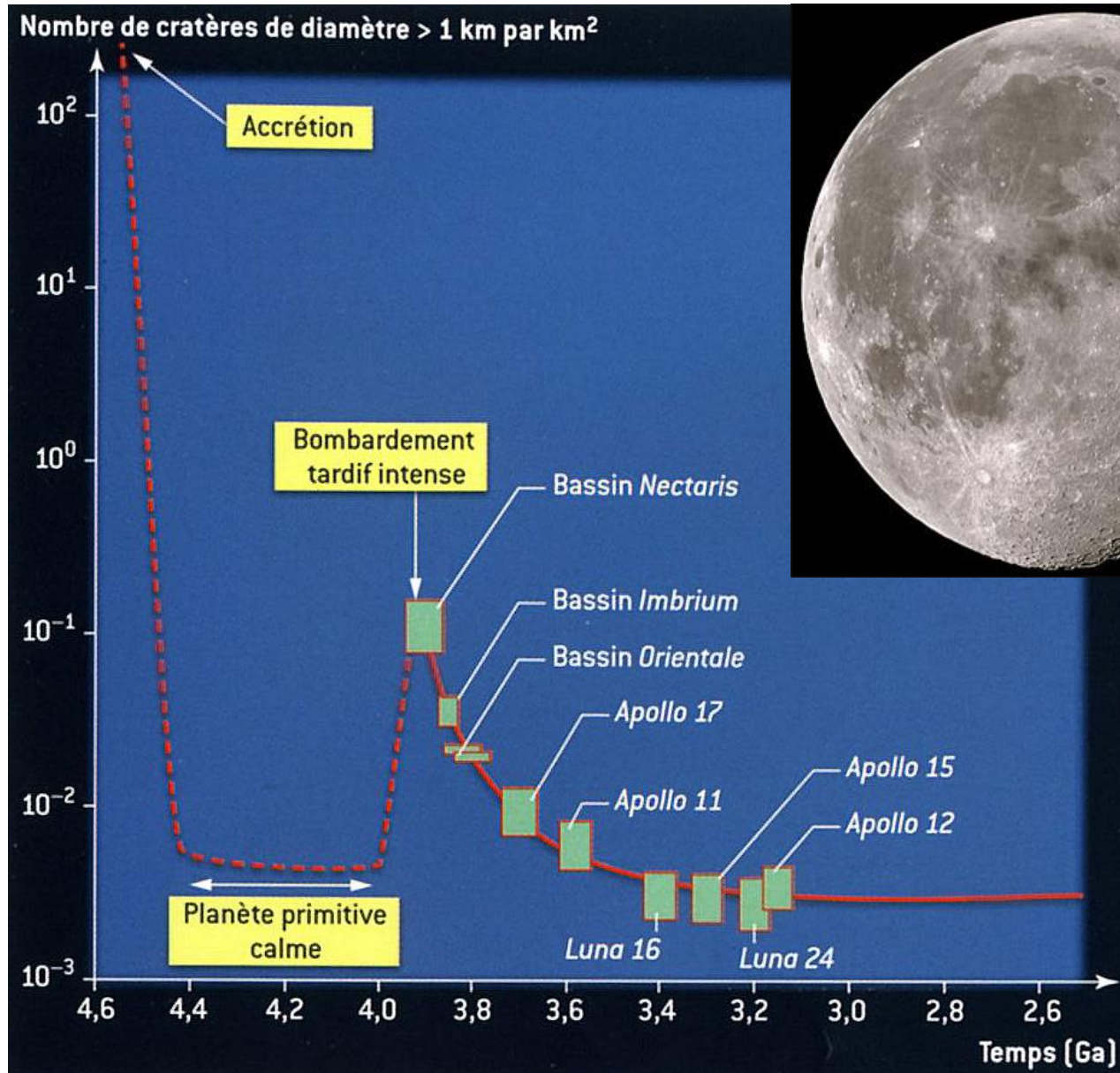


Les océans sont présents depuis 4,4 Ga !

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

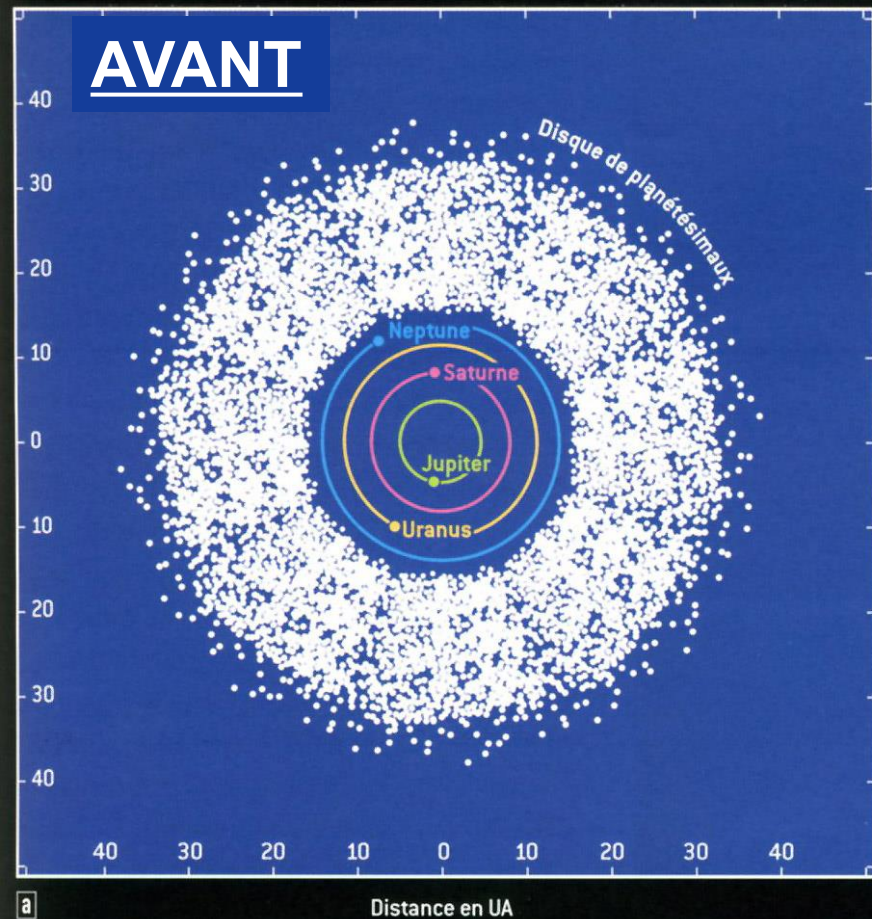
Le bombardement météoritique tardif (~ 4 Ga)

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

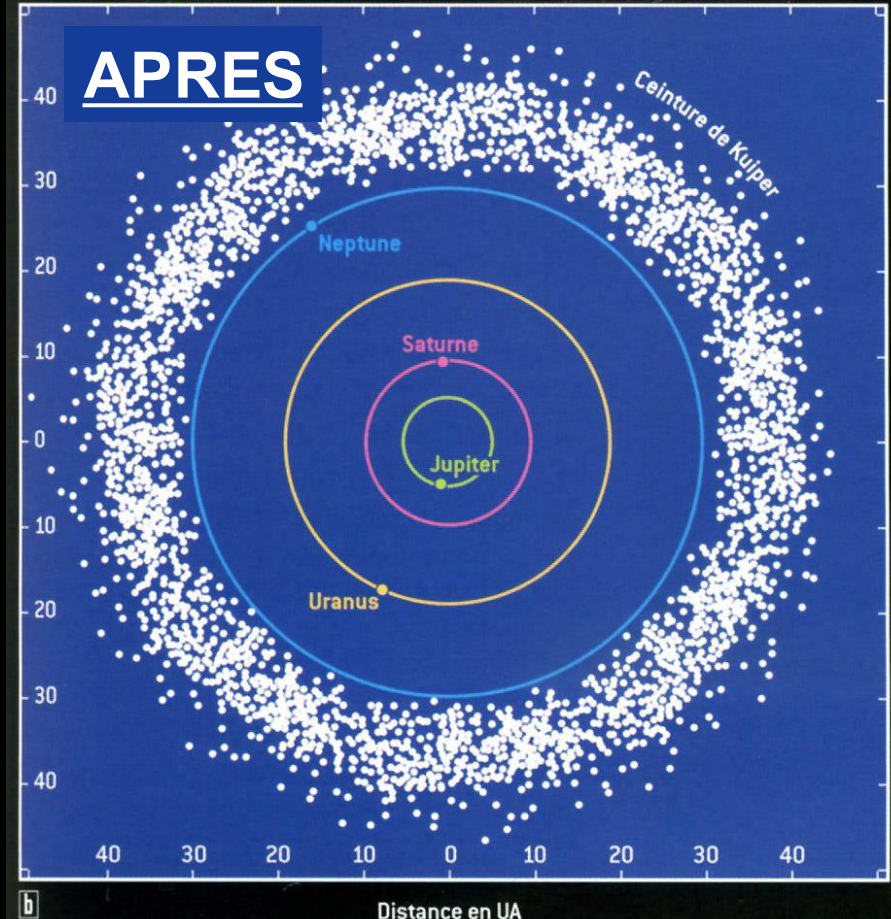


Le bombardement météoritique tardif (~ 4 Ga)

AVANT



APRES

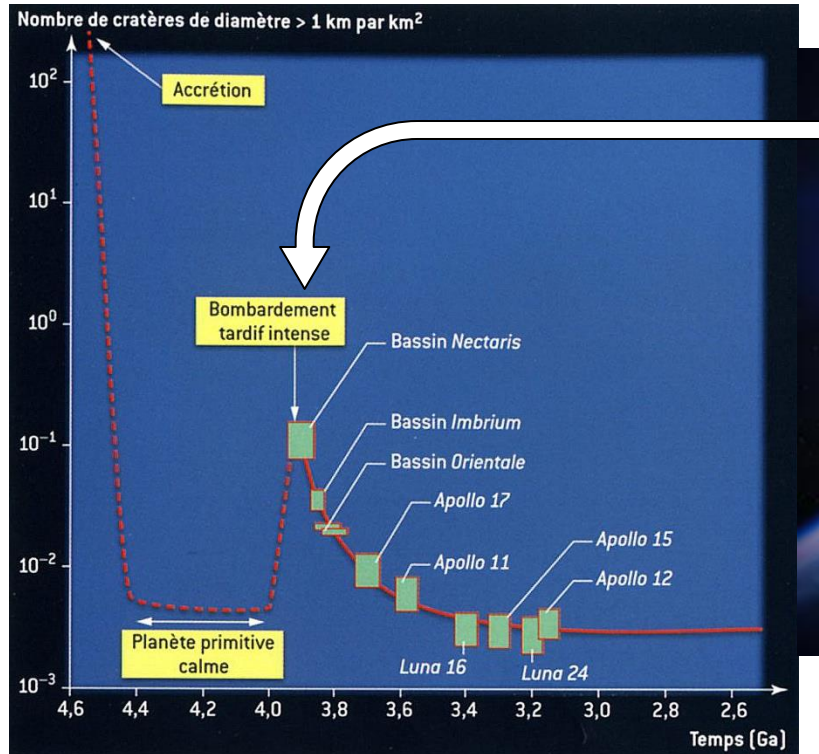


Jupiter dérivant vers le centre du système solaire et **Saturne** s'en éloignant sont entrées en résonance. Cela a déstabilisé l'orbite des planètes géantes. **Neptune** a alors croisé le disque externe rempli de planétésimaux → **bombardement météoritique tardif**

II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

Le bombardement météoritique tardif (~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

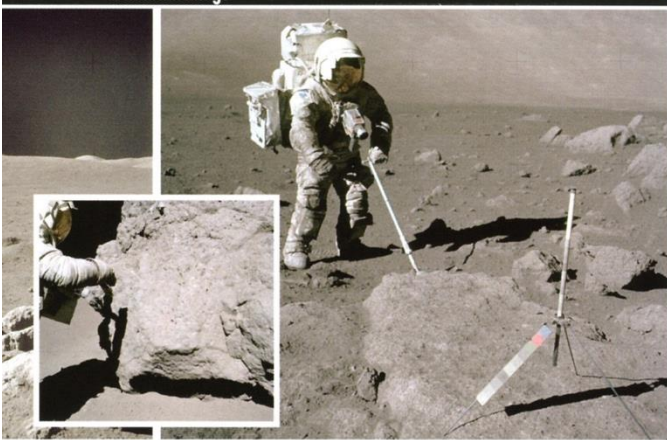
II. L'Hadéen (4.55 – 4 Ga)

Formation des premières roches

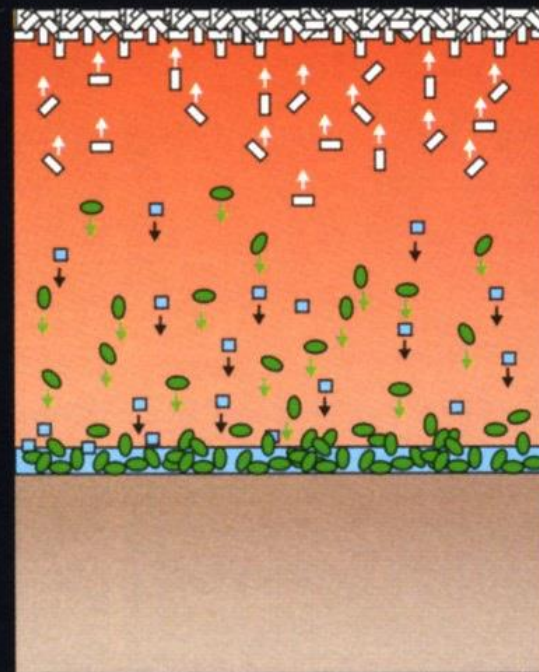
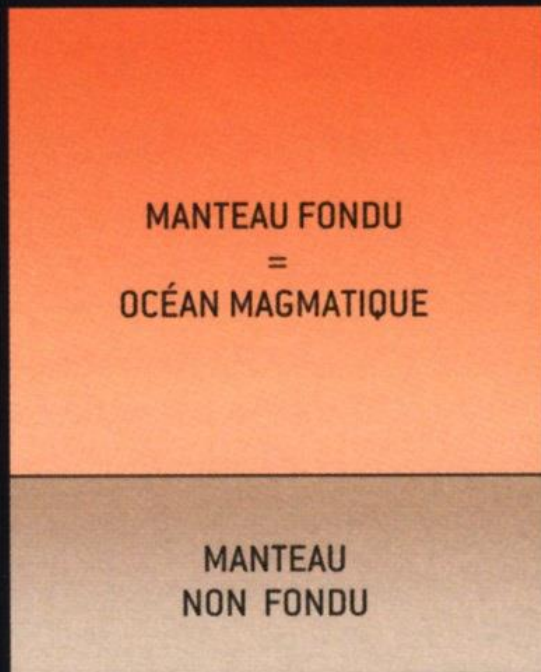
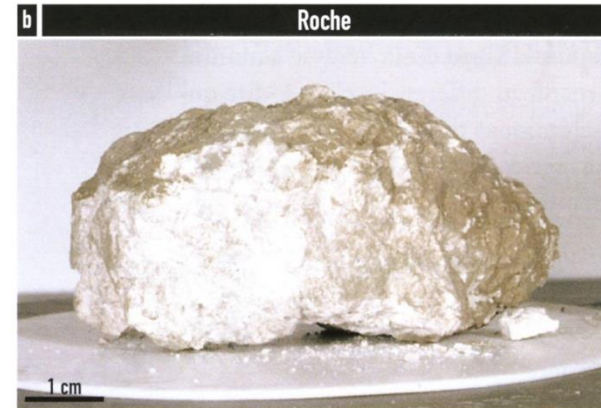
À l'Hadéen, on a probablement la formation de croûte primitive dès 4,4 Ga avec le refroidissement de l'océan magmatique



Échantillonnage



On a vu les preuves
de l'océan
magmatique lunaire



← 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)

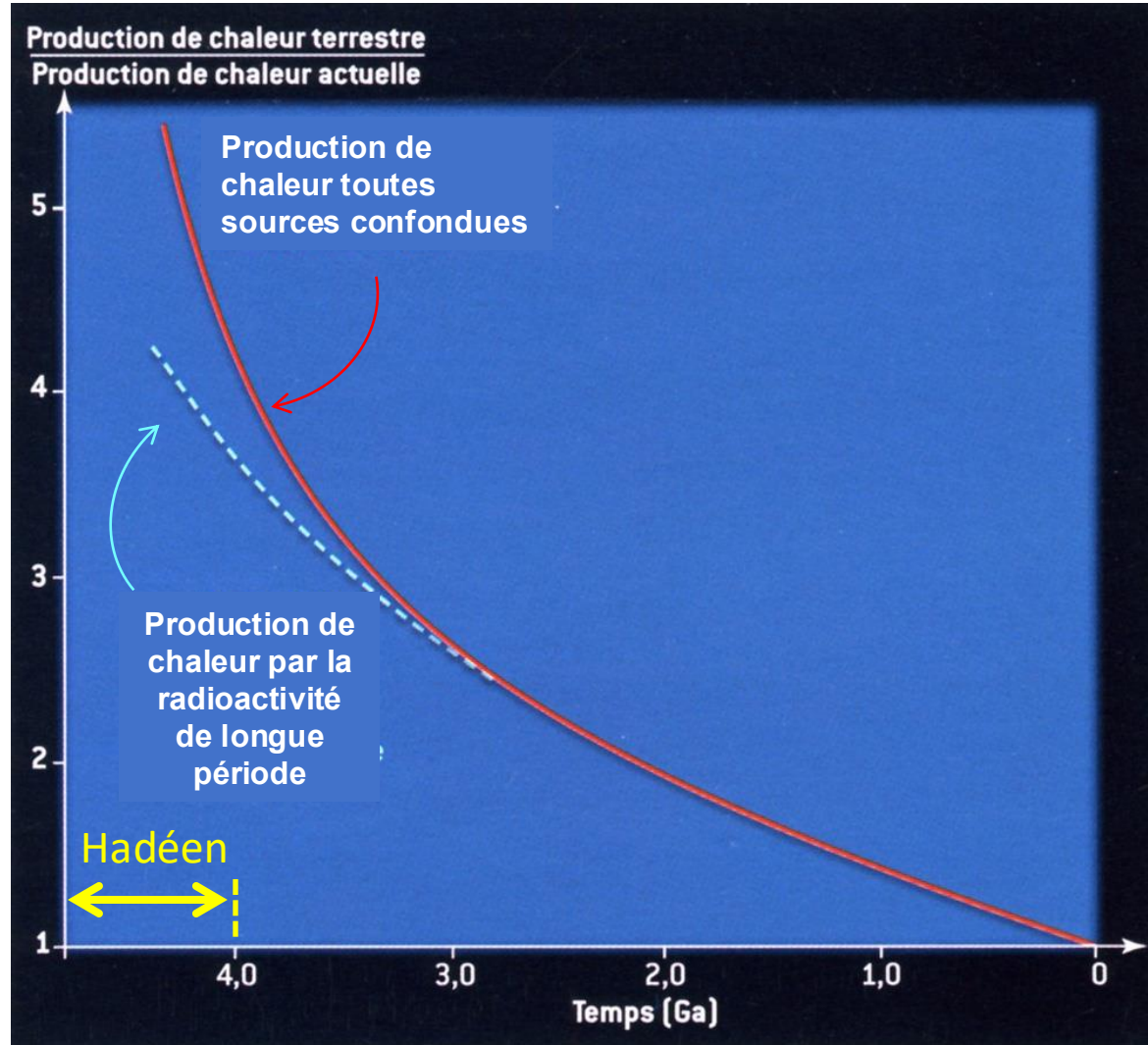
Source d'énergie pour faire fondre une partie du manteau :

- Contraction gravitationnelle initiale

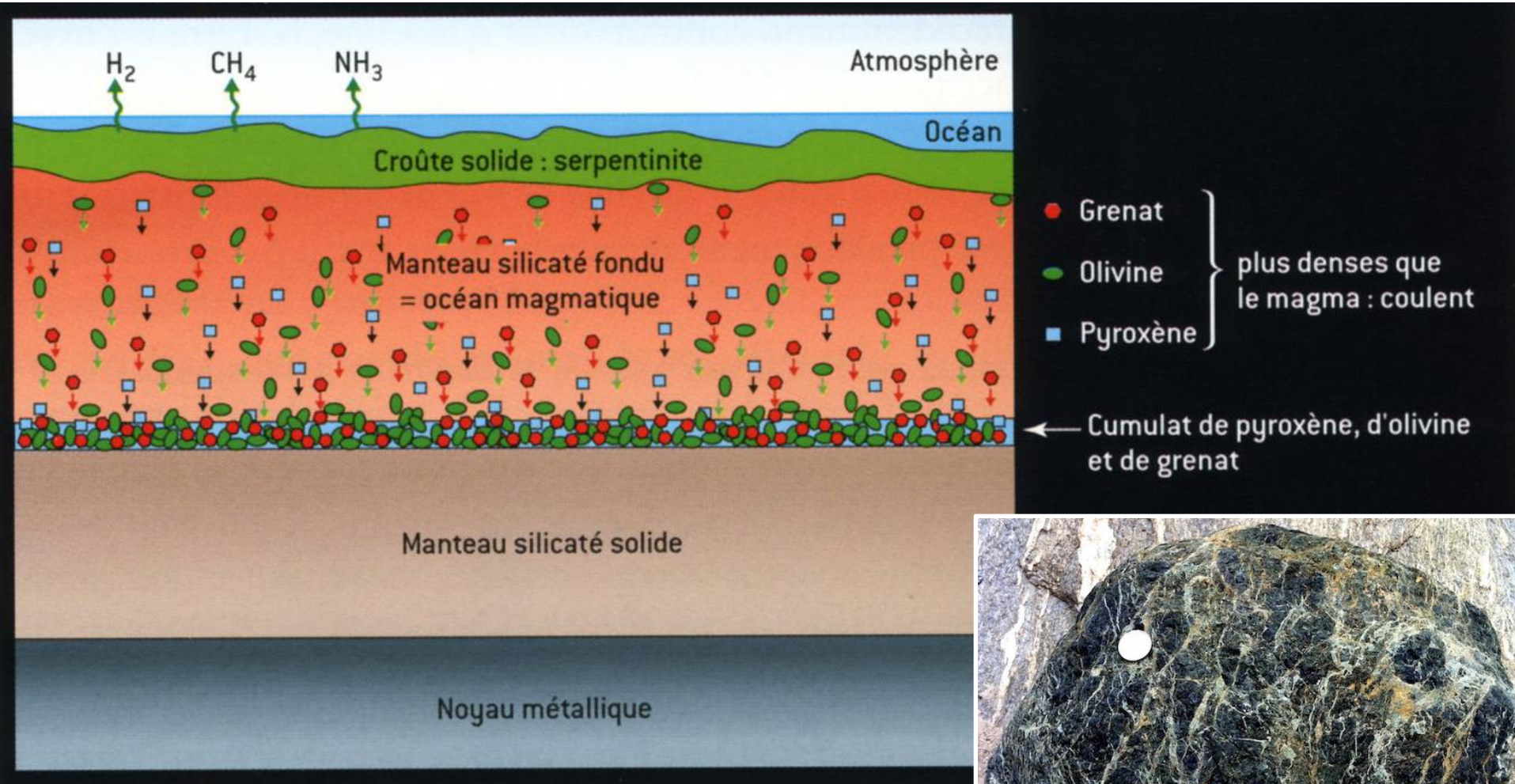
- Radioactivité (K, U, Th + ^{60}Fe , ^{26}Al)

Radioactivité éteinte

Présence d'un océan magmatique !



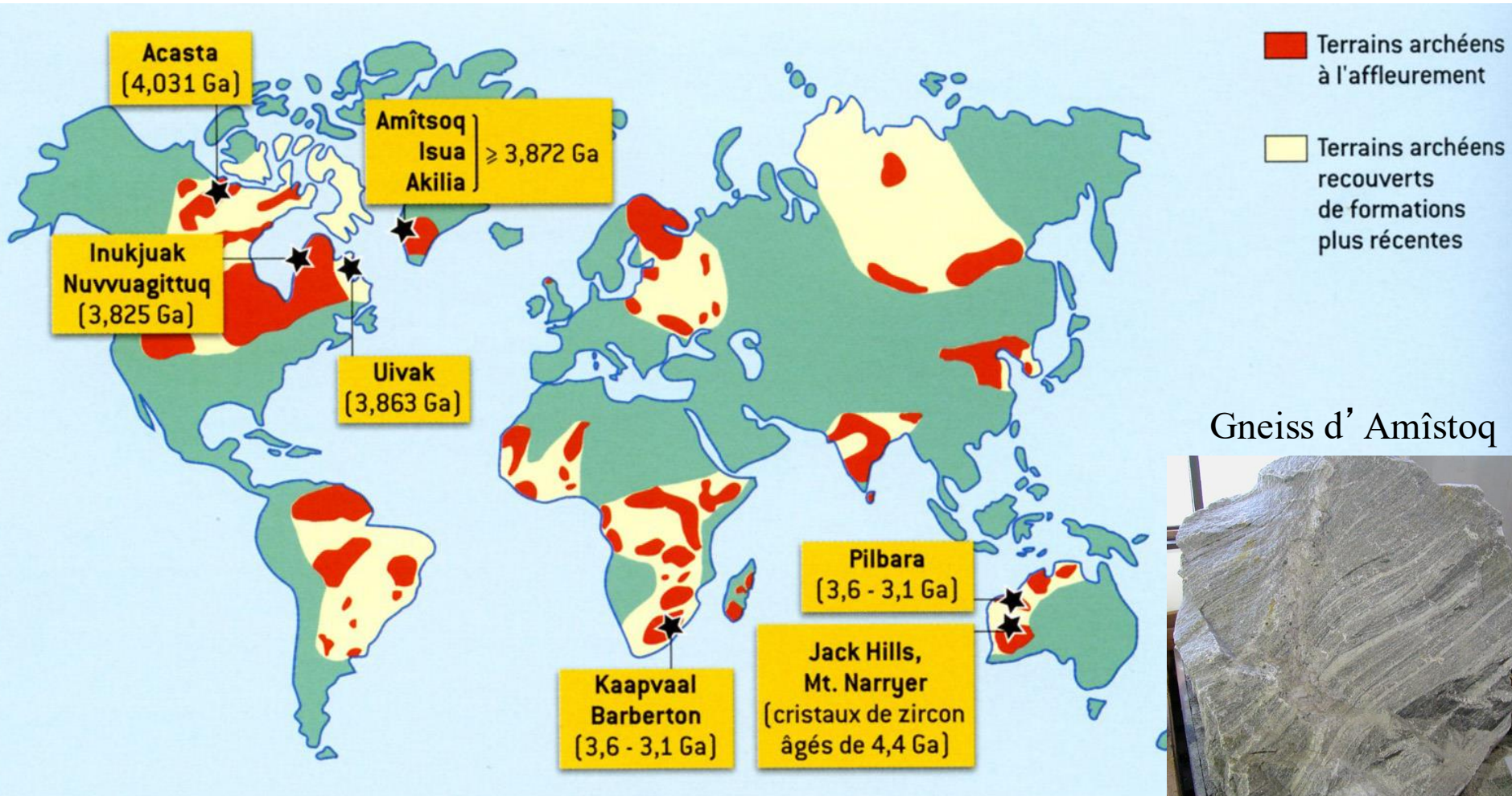
Lors du refroidissement de cet océan magmatique: formation d'une **croûte océanique primitive**



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

III. L'Archéen (4 - 2,5 Ga)

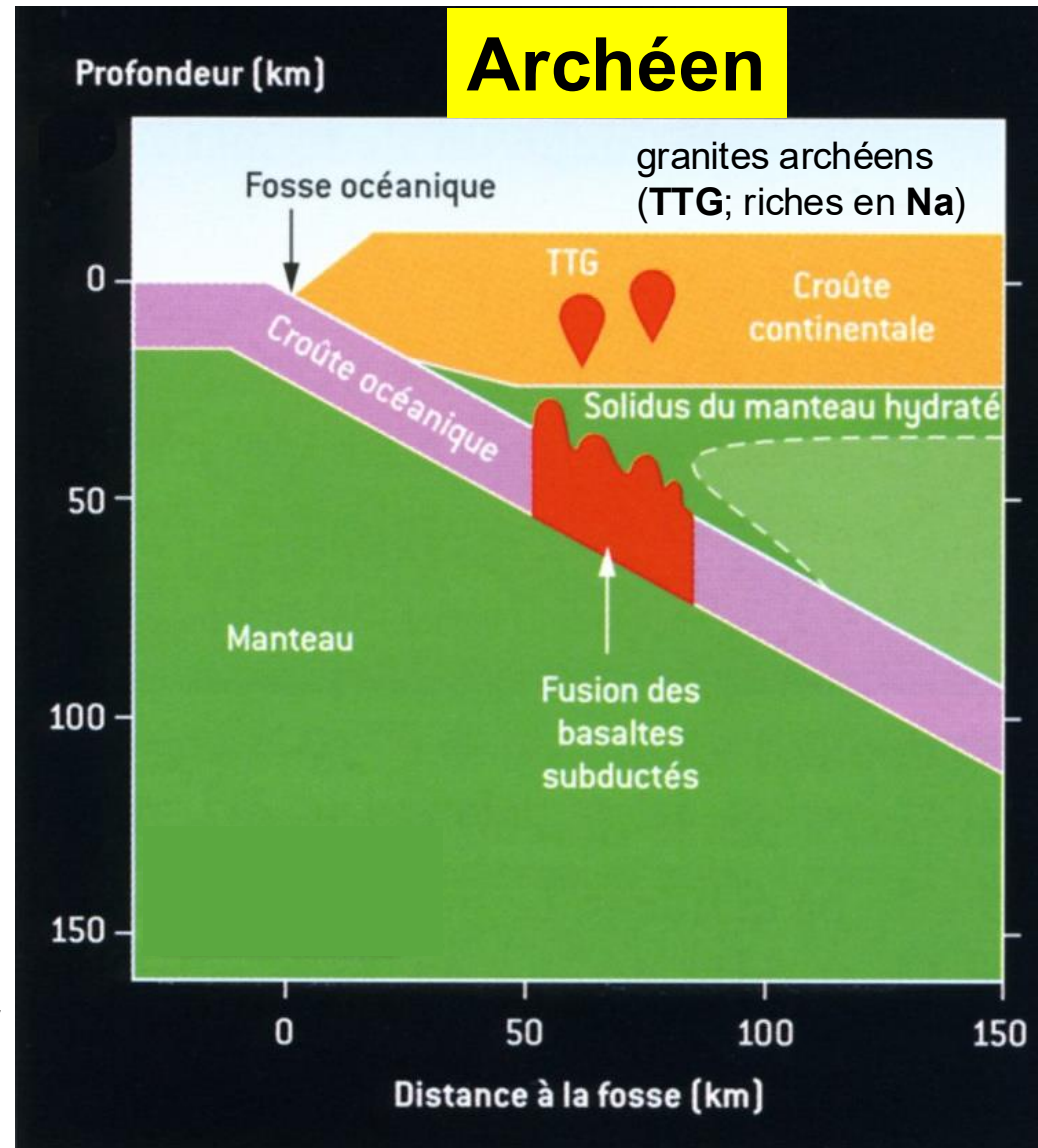
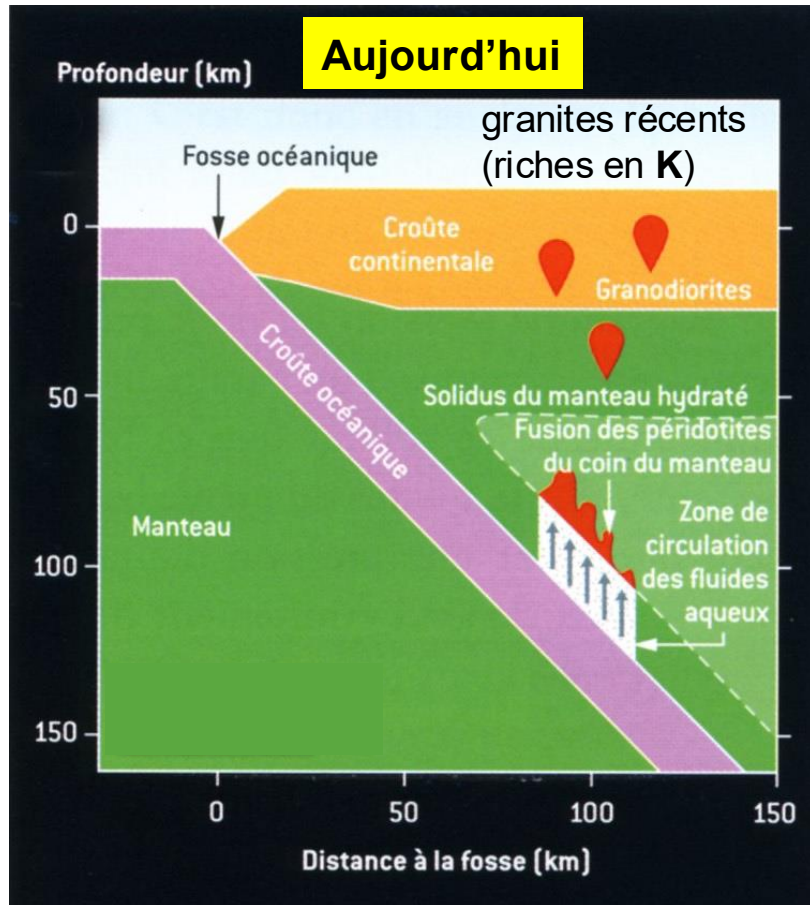
Localisation des plus vieilles roches de la surface



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



A 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 $\sim 1600^{\circ}\text{C}$

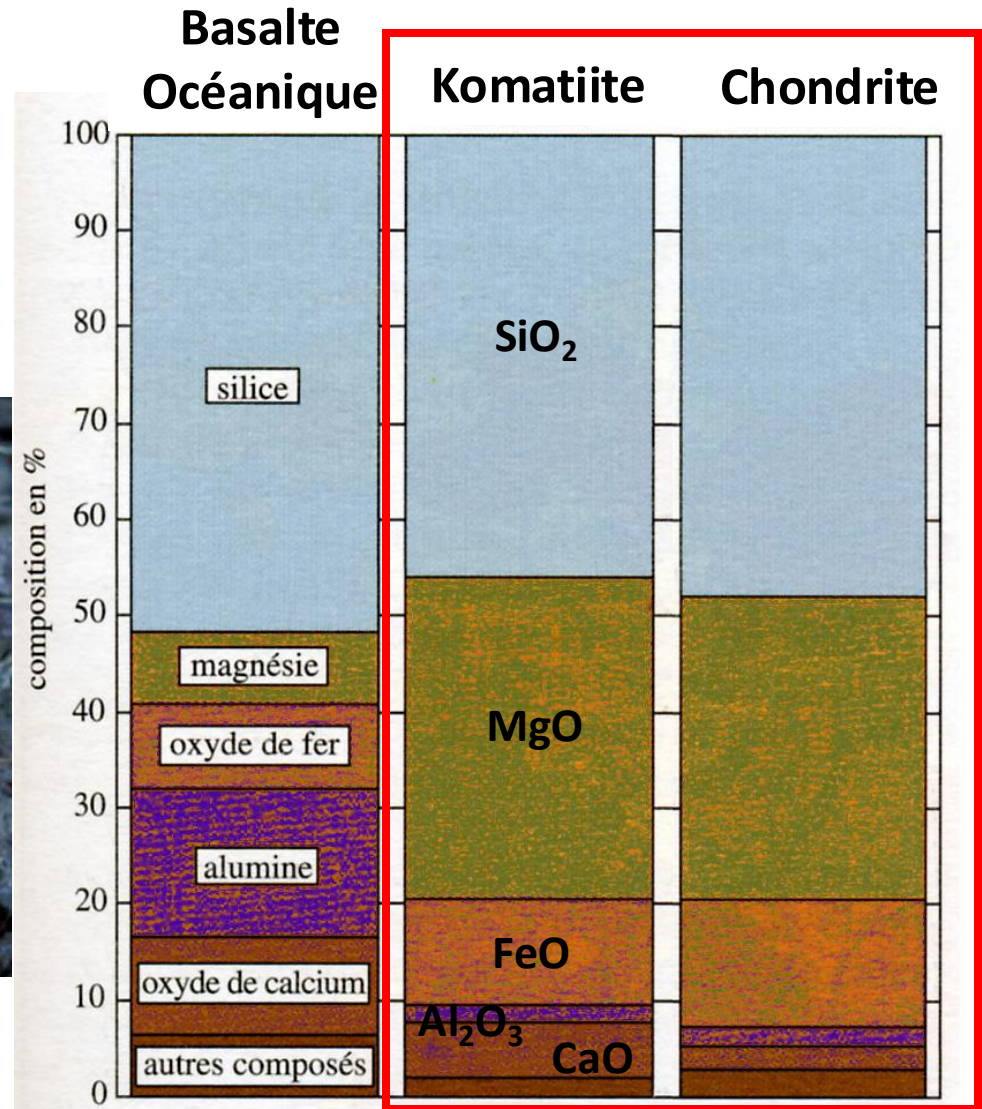
(Pour les basaltes actuels $T \sim 1200^{\circ}\text{C}$)

-> **taux de fusion partielle très élevé à l'Archéen (jusqu'à 60%)**

(aujourd'hui: 20-30% max.)



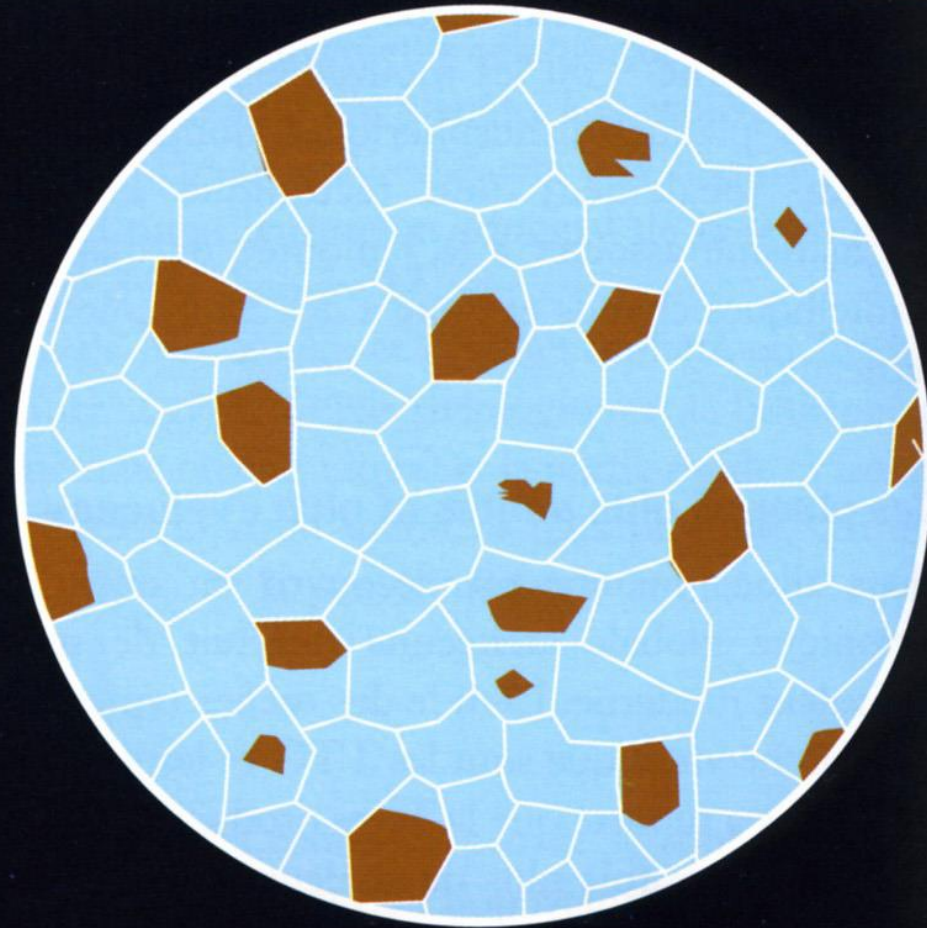
komatiite



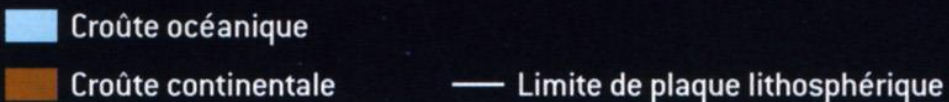
Fort gradient thermique => convection très active
=> nombreuses petites plaques tectoniques
(seule la croûte océanique archéenne a été recyclée dans le manteau)



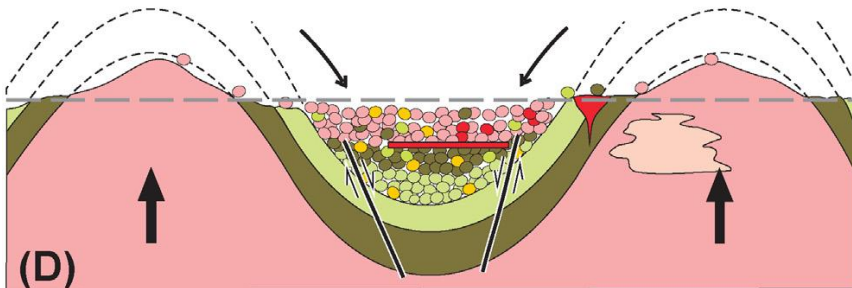
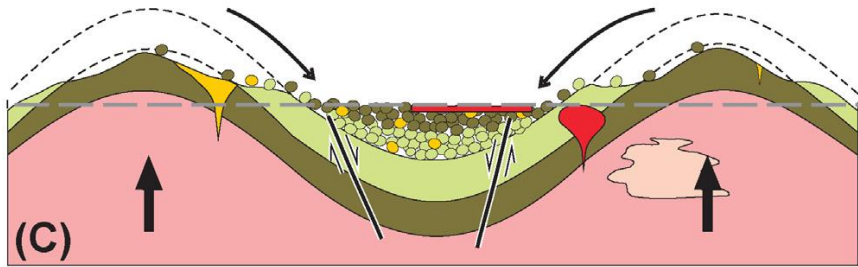
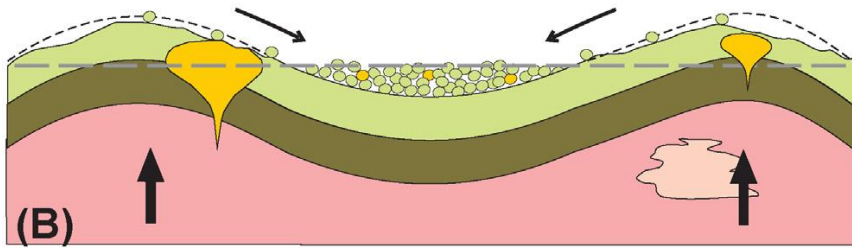
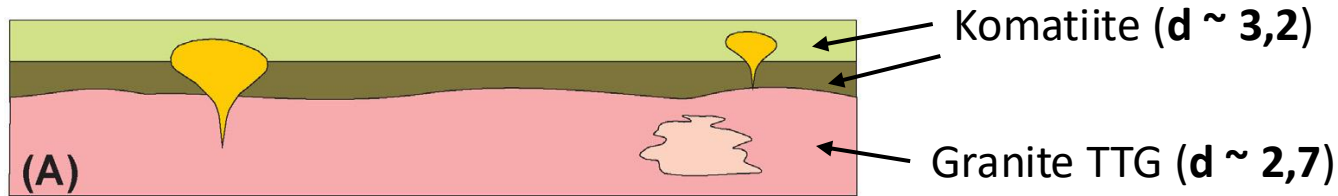
AUJOURD'HUI



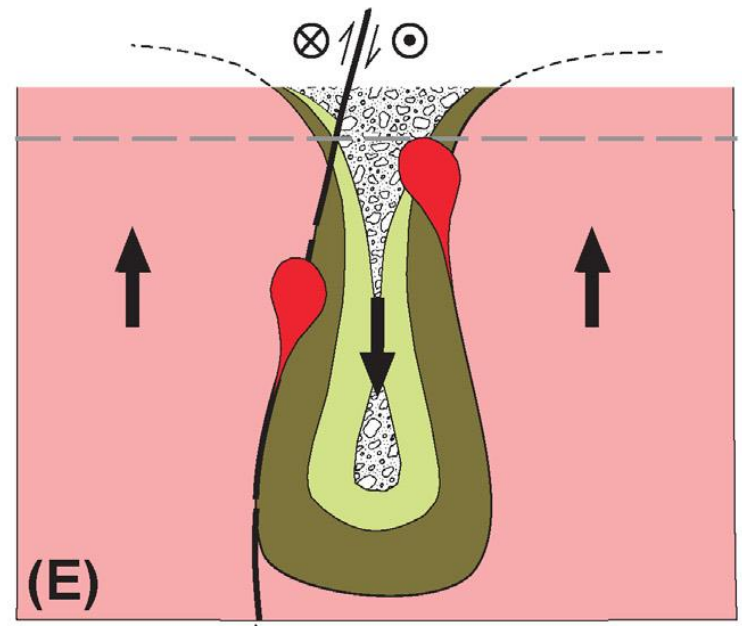
ARCHÉEN



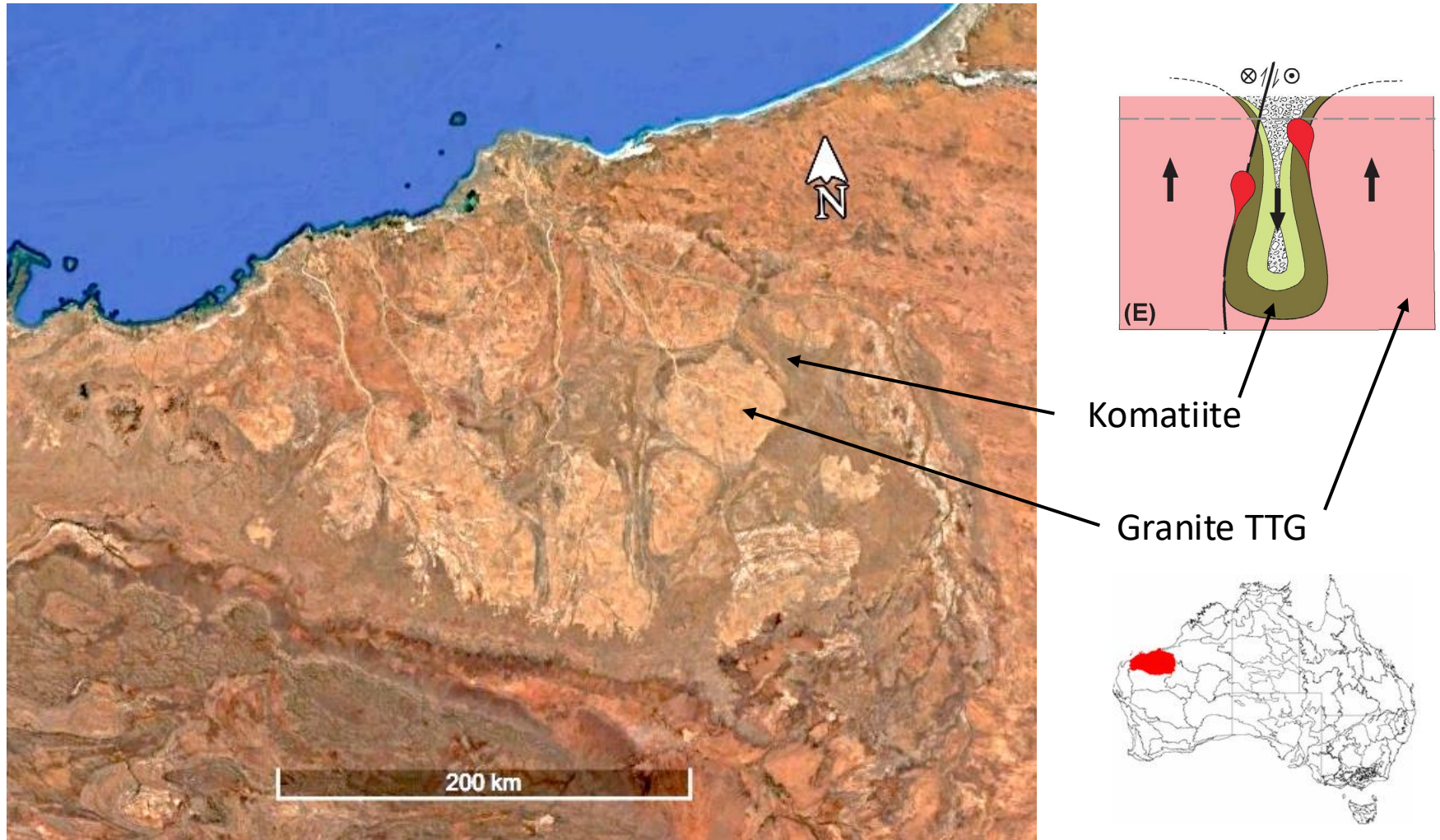
Avec la tectonique horizontale déjà présente, on a également une **tectonique verticale** (sagduction). Elle est uniquement présente à l'Archéen.



Le moteur de cette tectonique est la gravité.

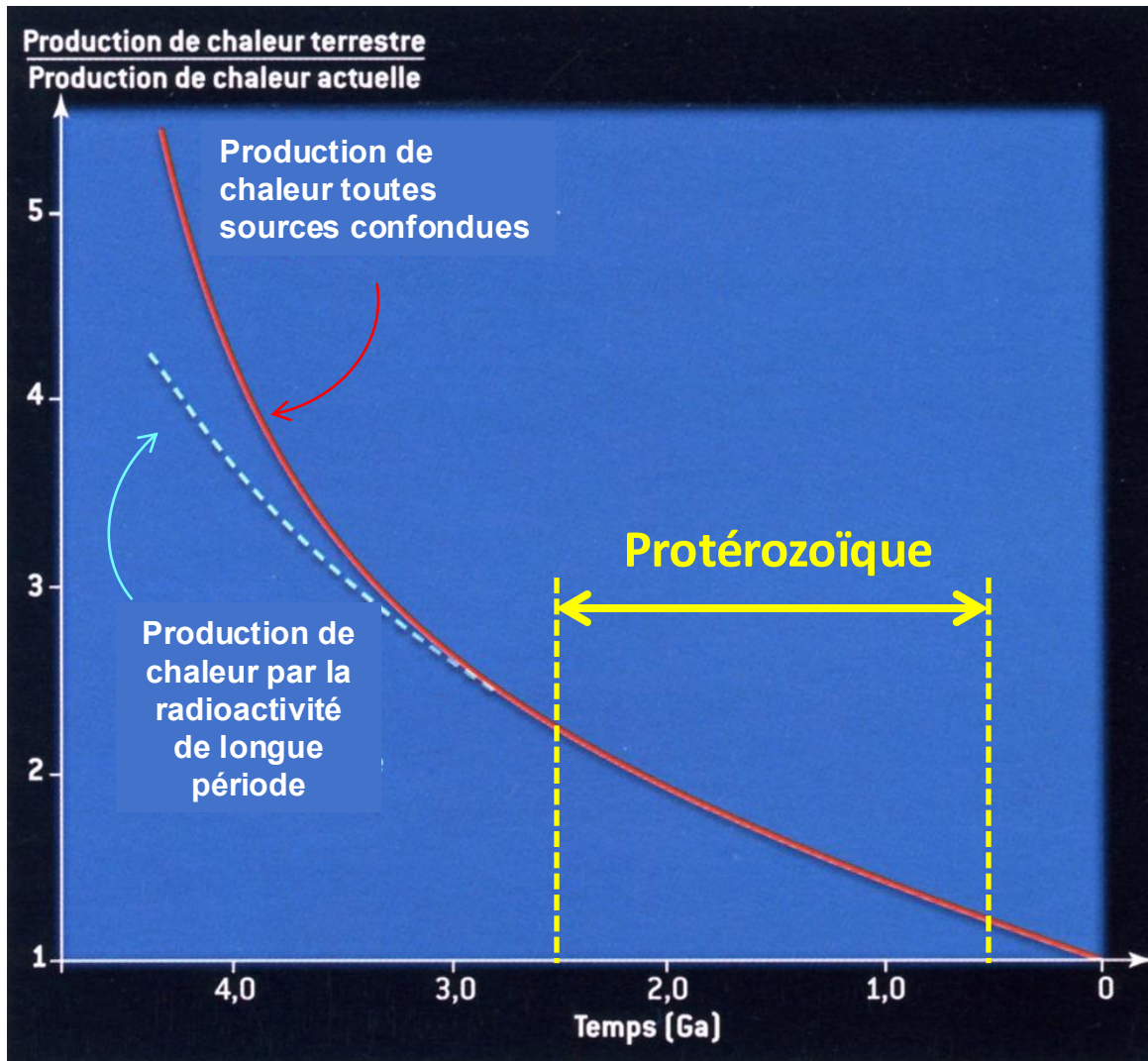


La tectonique verticale (sagduction); exemple de Pilbara (Australie)

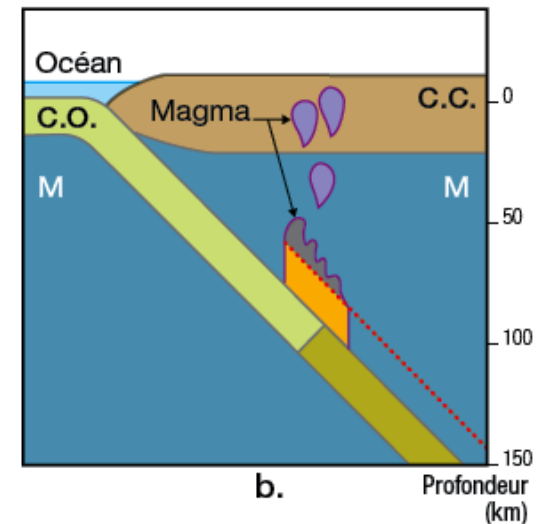


Après 2,5 Ga, le gradient thermique devient trop faible pour la formation des Komatiites: seuls les mouvements horizontaux perdurent.

IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



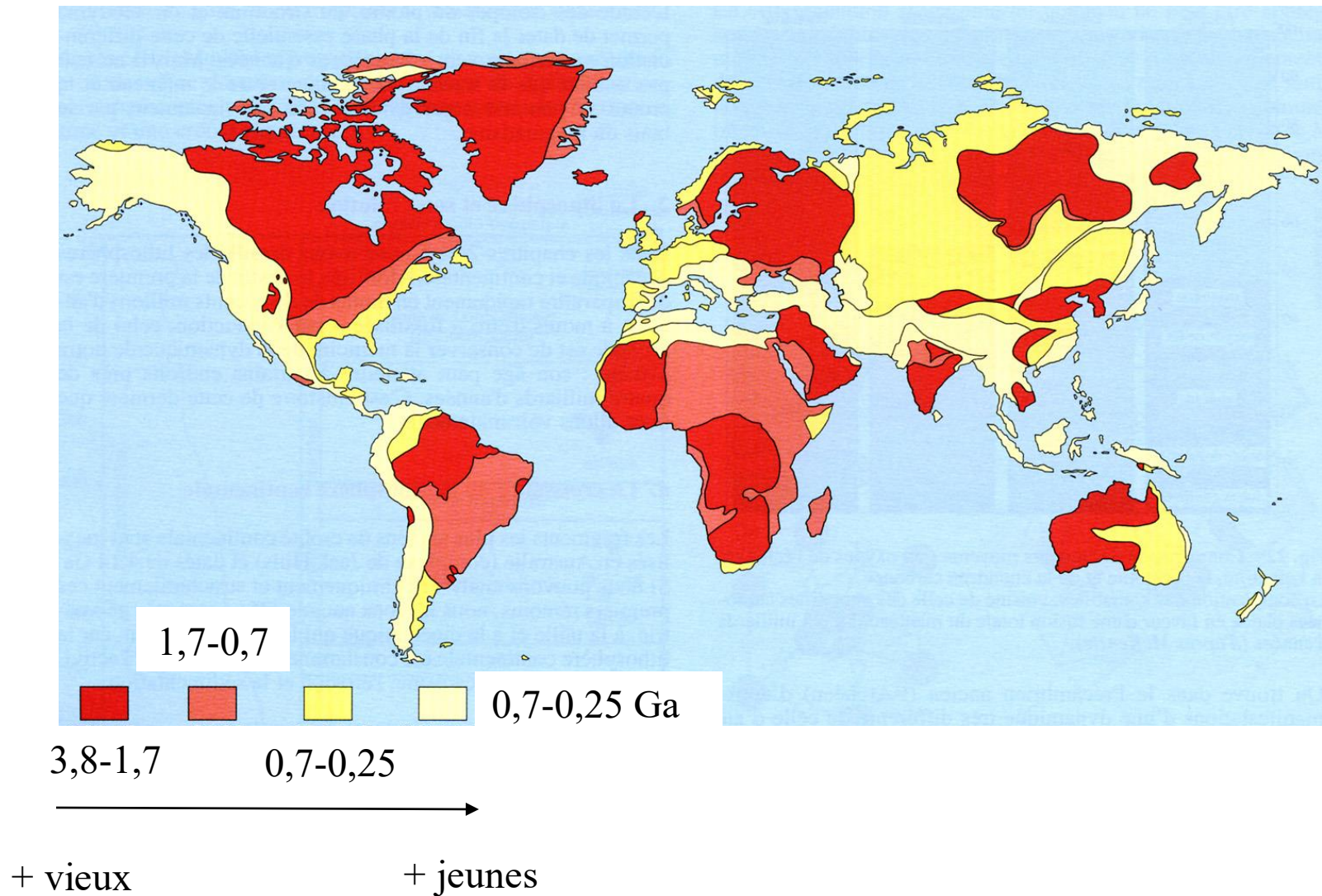
Au Protérozoïque, le gradient thermique devient trop faible pour la formation des Komatiites et des granites TTG.



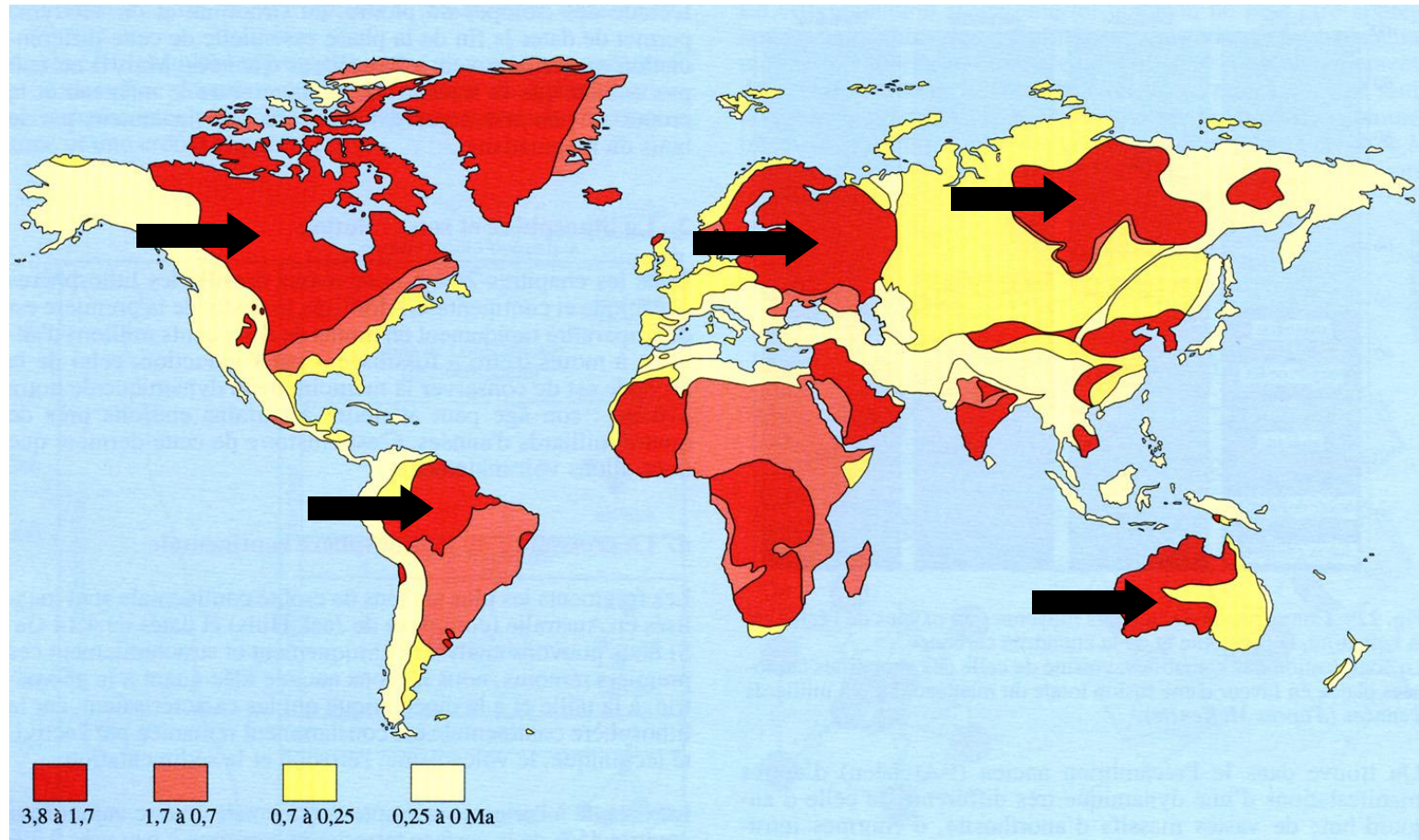
Dorénavant, c'est l'hydratation des péridotites du manteau qui permet leur fusion partielle.

IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)

Phase importante de croissance continentale

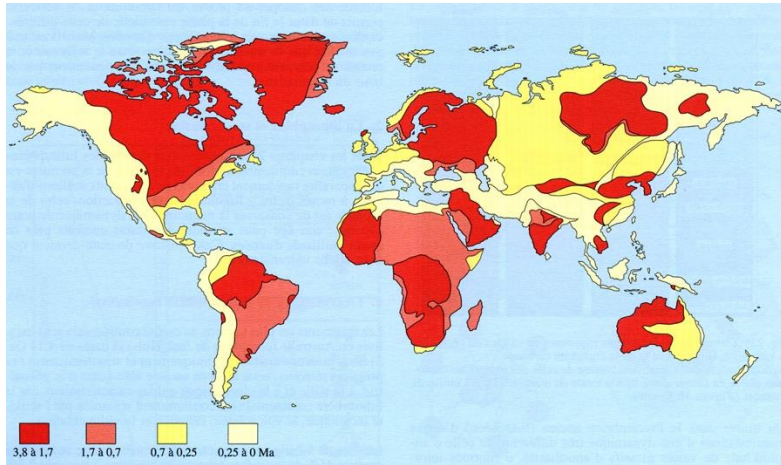


IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



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

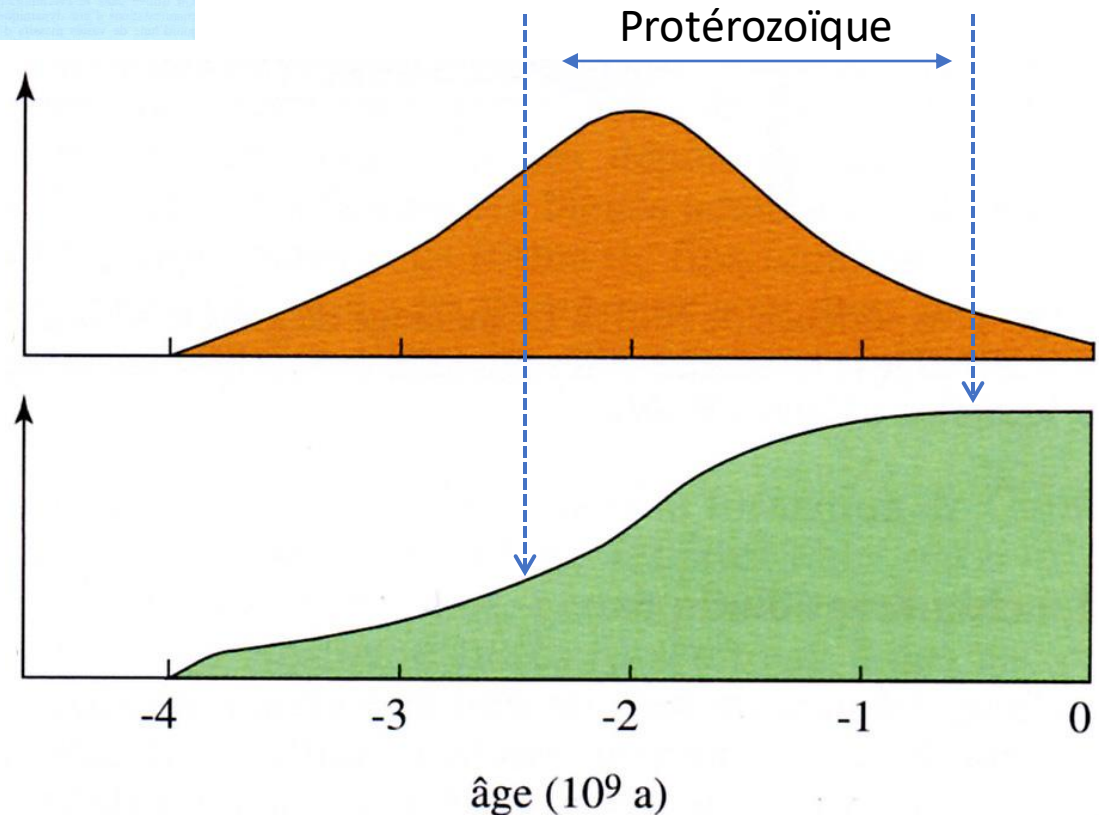
IV. Le Protérozoïque (2,5 – 0,54 Ga)



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

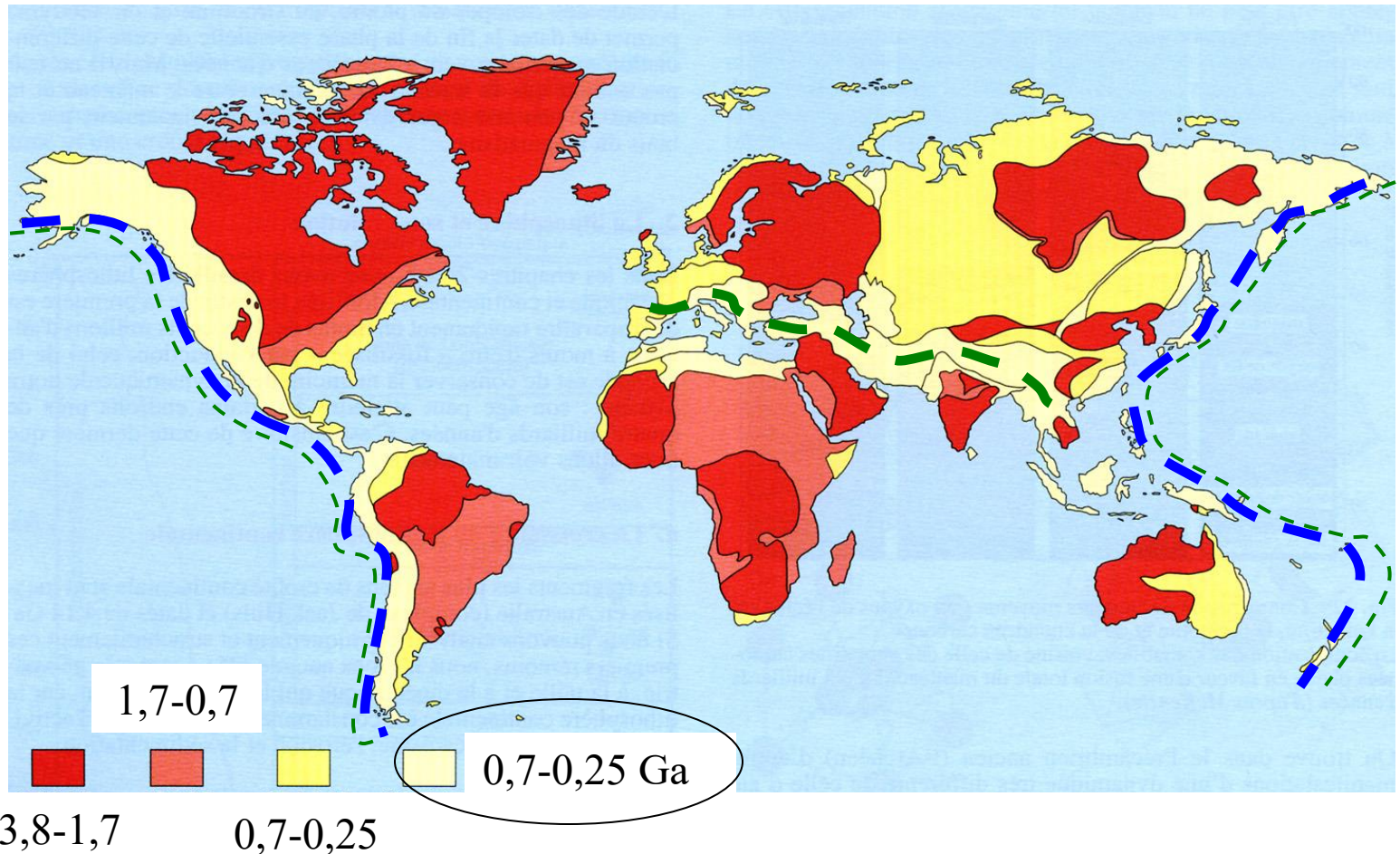
Production de
croûte continentale

Surface des
continents



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 OCEAN)

en 4 Ga



ATMOSPHERE ACTUELLE

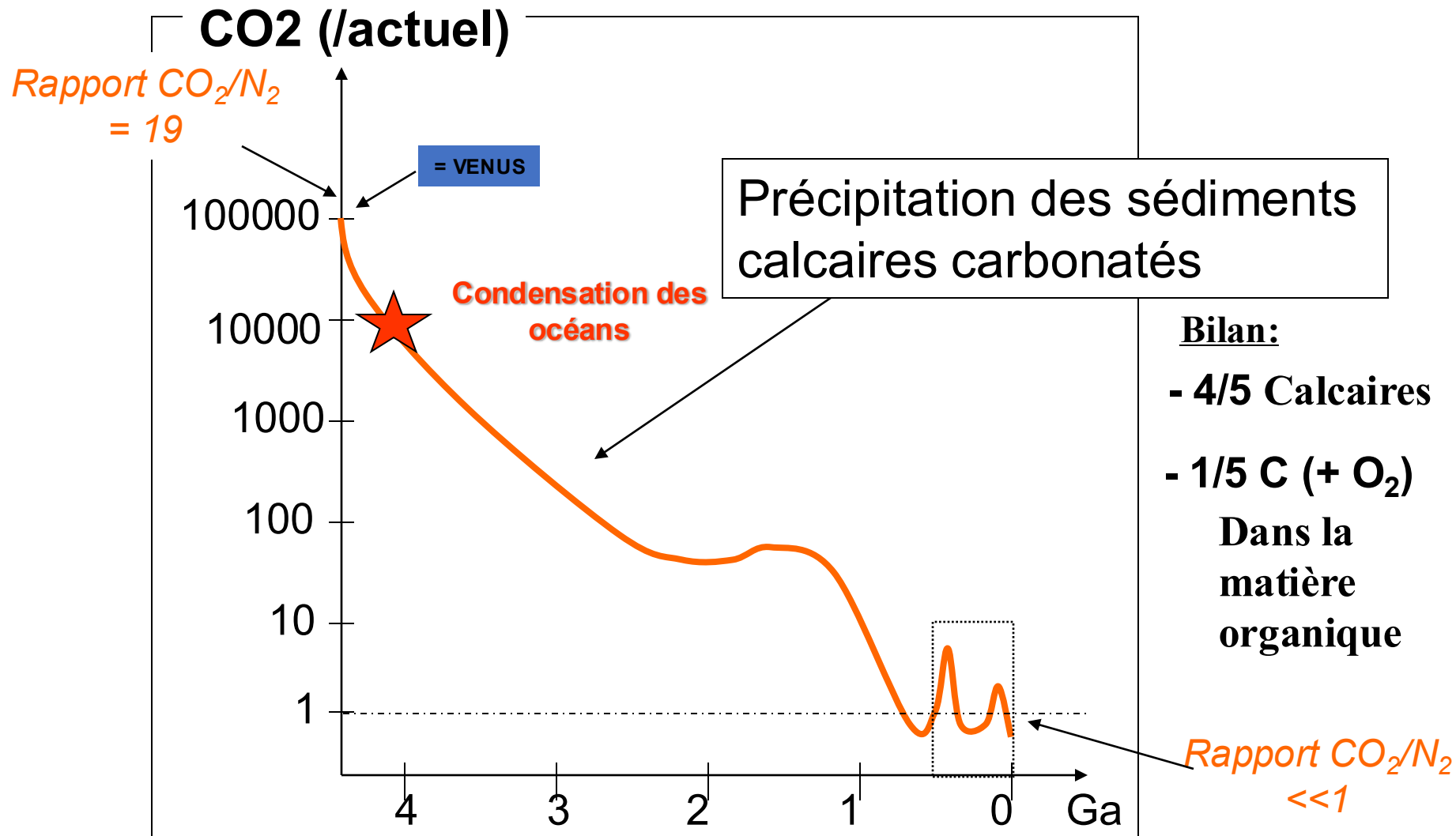
$\text{CO}_2 = 0.04\%$

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

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

Mécanismes mis en jeu ?

Evolution du CO_2 dans l'atmosphère terrestre



A la fin du Précambrien, le CO_2 a atteint sa concentration actuelle

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**)



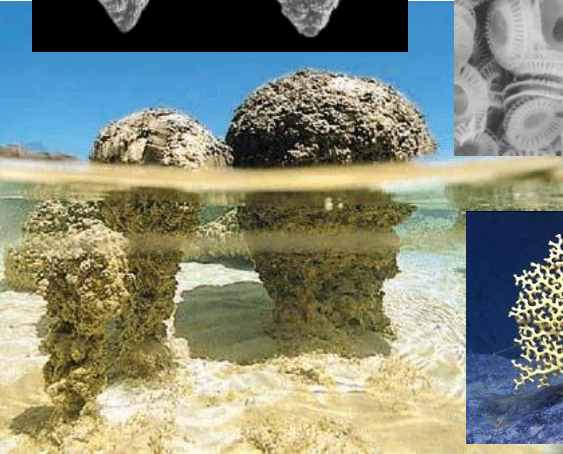
3) Transfert vers la mer

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



Donc: $2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$

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.

Donc: $2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$

Bilan: 2 CO_2 consommés et un seul rejeté

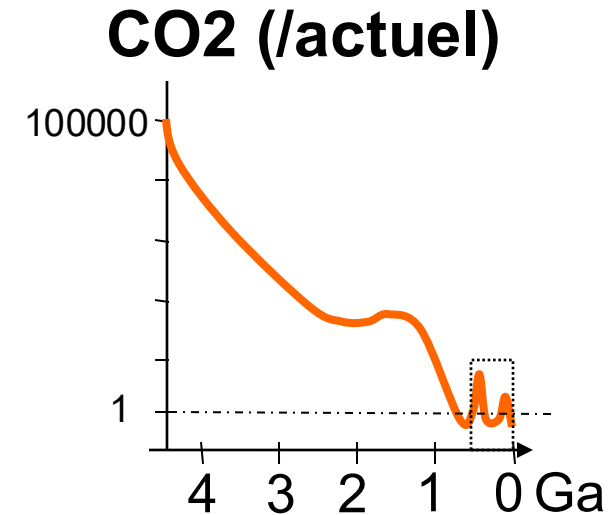
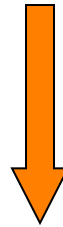
Le CO_2 atmosphérique s'est donc transformé en CO_2 lithosphérique (calcaire) au cours des milliards d'années.

Les variations aux grandes échelles de temps sont dues à la compétition entre l'altération continentale (qui pompe du CO_2) et le volcanisme qui en fournit.

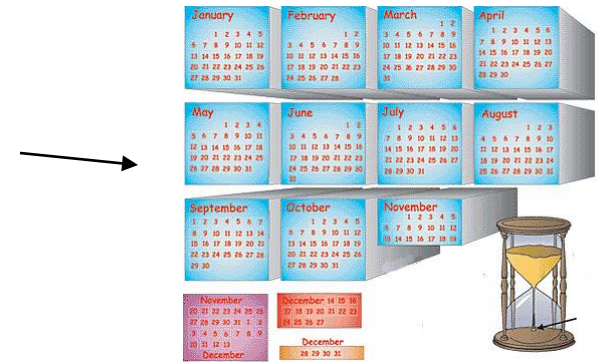
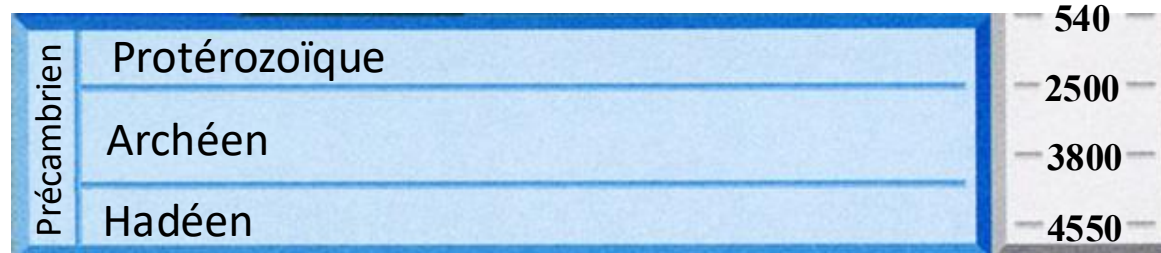
Au cours du temps, le taux de CO_2 a baissé d'un facteur 100 000; pression de CO_2 voisine de $30 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ juste après la formation de la Terre (avec P vapeur d'eau: $270 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), et de 40 Pa actuellement.

Donc: $2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$

Le CO_2 atmosphérique s'est donc transformé en CO_2 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)

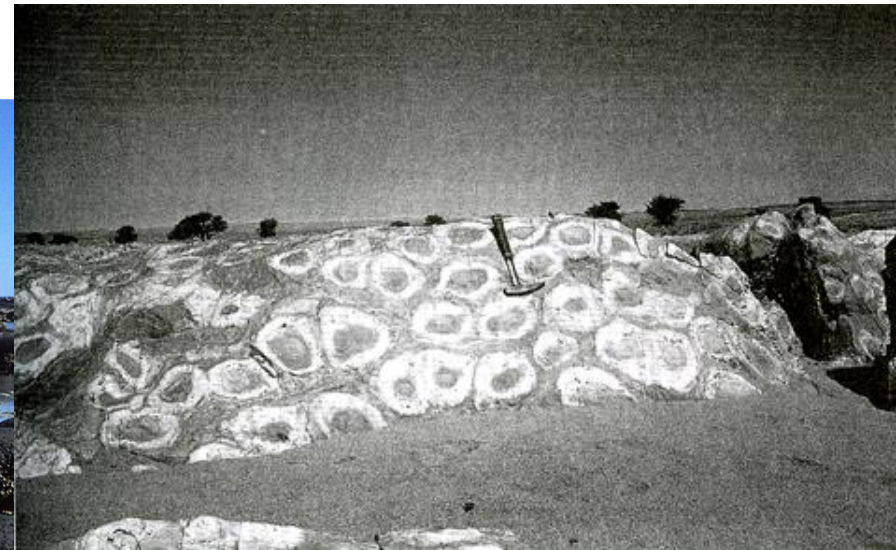
A l'Hadéen, on a très peu de roches conservées
-> peu d'information

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*).

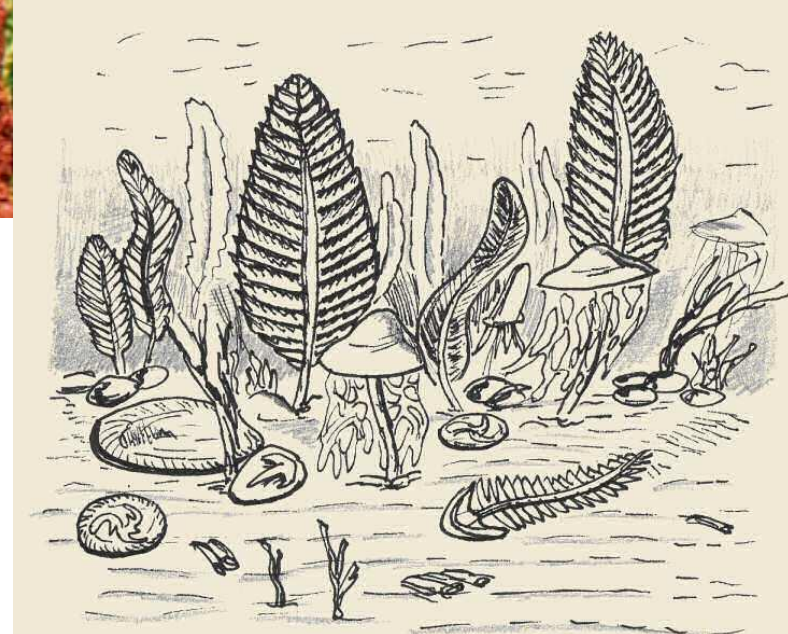
Des **stromatolithes** (*constructions carbonatées résultant de l'activité de cyanobactéries, algues unicellulaires*) sont datés pour les plus anciens à environ **3.5 Ga**



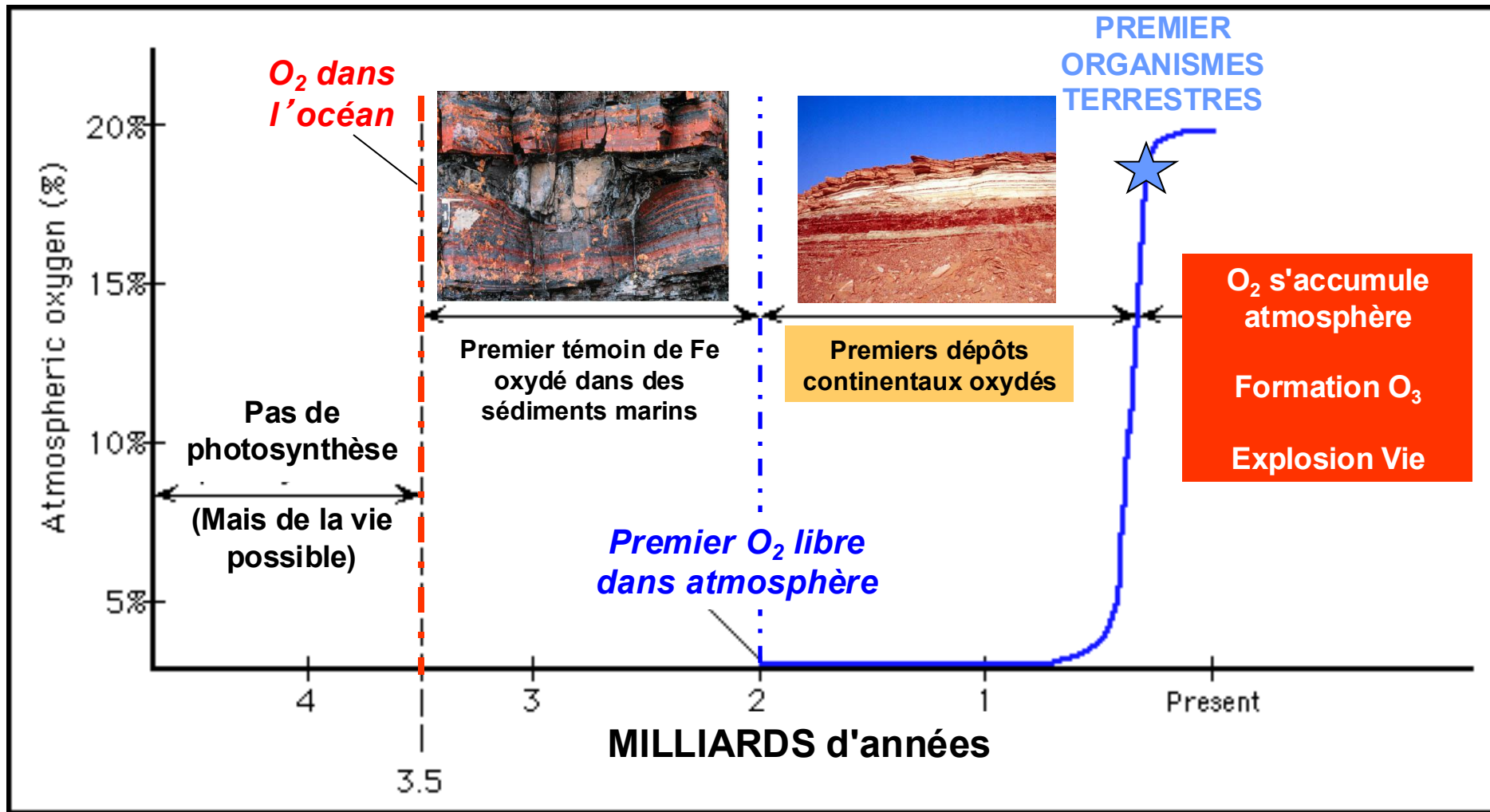
→ Production d' O_2
par photosynthèse

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 O_2 dans l'atmosphère terrestre

Vers 2 Ga

Dépôts **marins**



Dépôts **continentaux**



FER RUBANE
(Banded Iron Formation: BIF)



RED BEDS
(Séd. Détritiques)

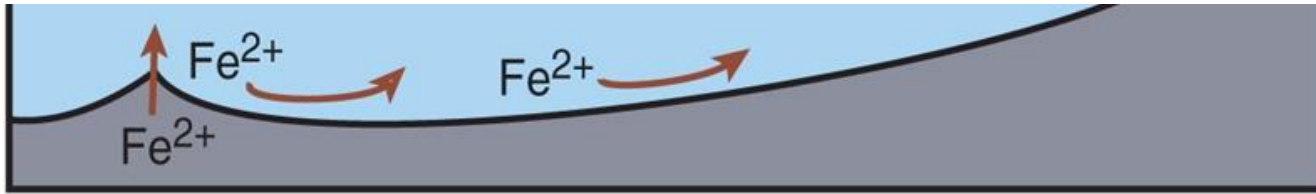
Formation des dépôts de fer rubané (BIF)

Ce sont les témoins de la présence d'O₂ dans les océans
(et ils représentent 80% de la production du fer mondial)



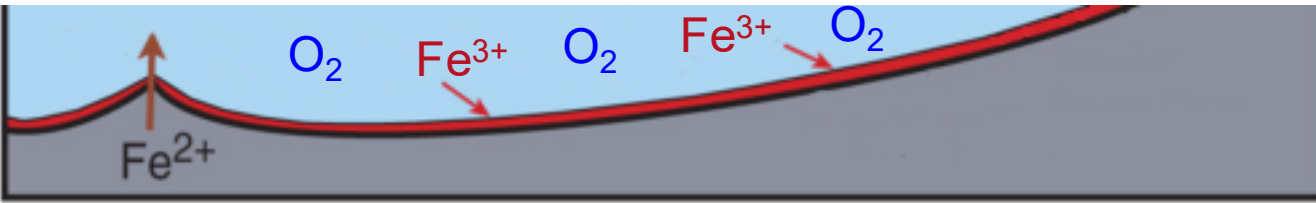
Formation des dépôts de fer rubané (BIF)

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.

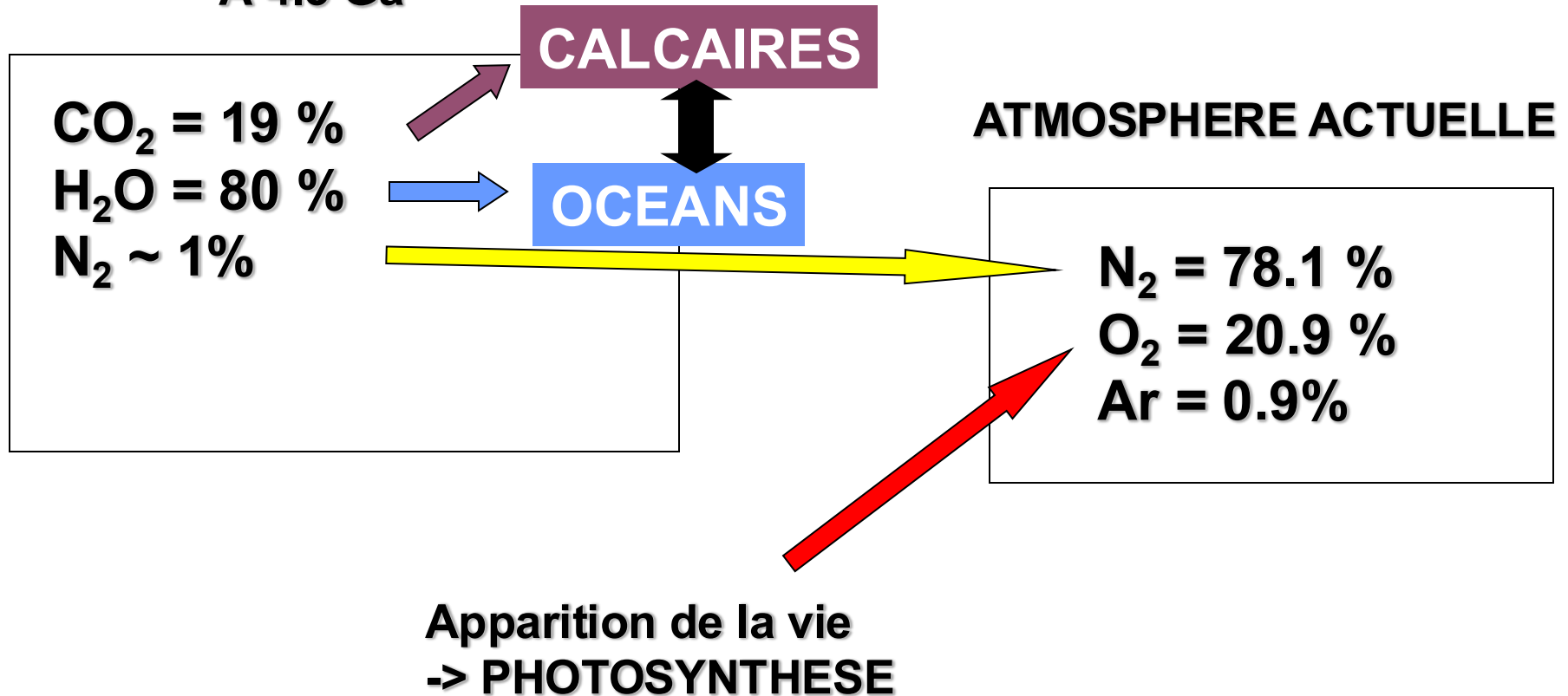


Photographie : Pierre Thomas

Evolution de l'atmosphère

ATMOSPHERE PRIMITIVE

À 4.5 Ga



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

VII. Le climat au Précambrien

| | | |
|-------------|---------------|------|
| Précambrien | | 540 |
| | Protérozoïque | 2500 |
| | Archéen | 3800 |
| | Hadéen | 4550 |

1) Hadéen: Climat très chaud

Chaleur interne très élevée

2) Archéen

Activité « faible du soleil », mais atmosphère riche en CO_2 : **climat chaud**

Ce phénomène est amplifié par:

- le taux de vapeur d'eau important car la surface océanique est grande*
- CO_2 non piégé par l'altération des silicates car la surface continentale est faible*

3) Protérozoïque

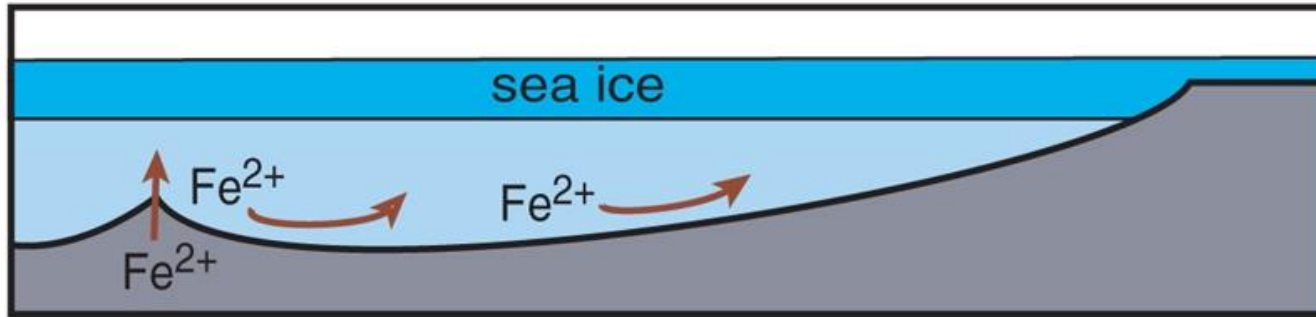
Premiers puits à CO_2 : carbonates de calcium (CaCO_3)
précipités par le développement des stromatolithes
Croissance continentale: premiers méga-continentes

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

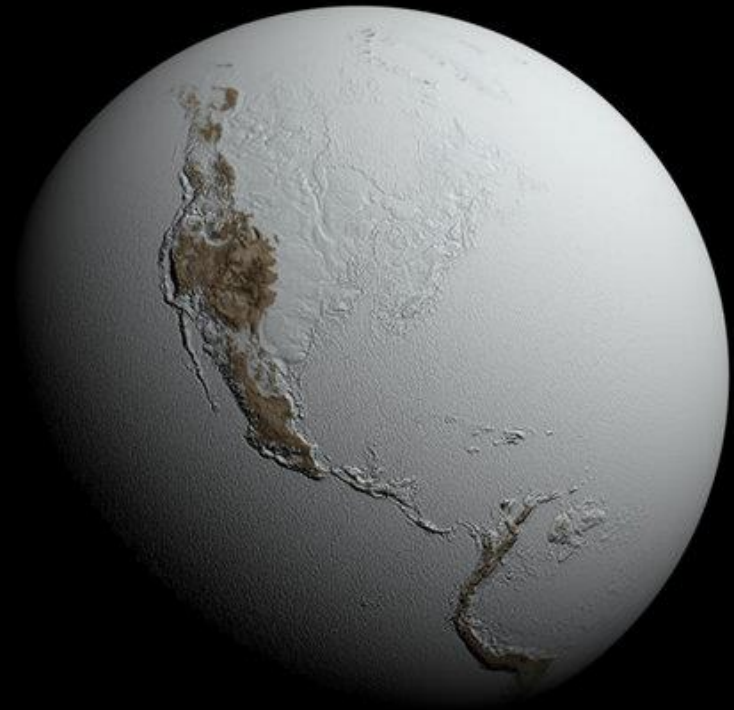
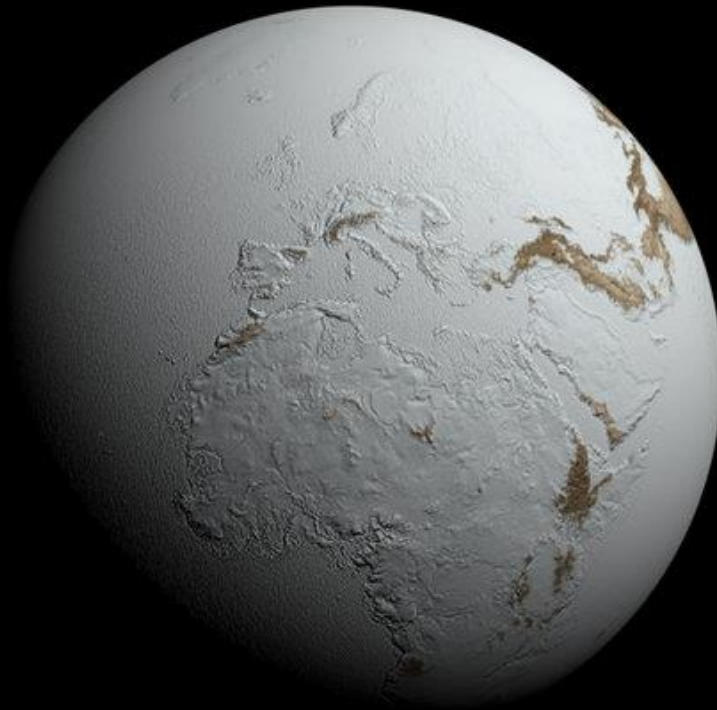
À ~2 Ga, quand l' O_2 envahit l'atmosphère, il va oxyder le méthane et ainsi réduire encore l'effet de serre de l'époque. Le soleil ne fournit encore que 85% de son énergie actuelle.

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

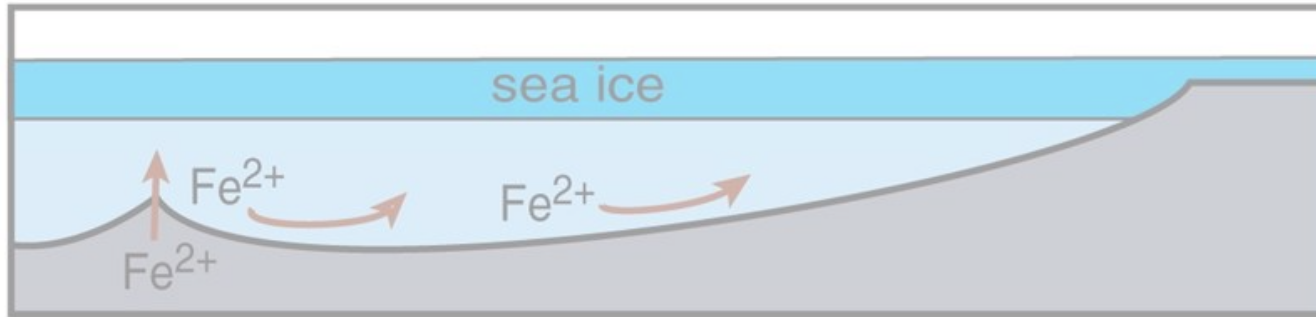
Les grandes glaciations : Terre « boule de neige »



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

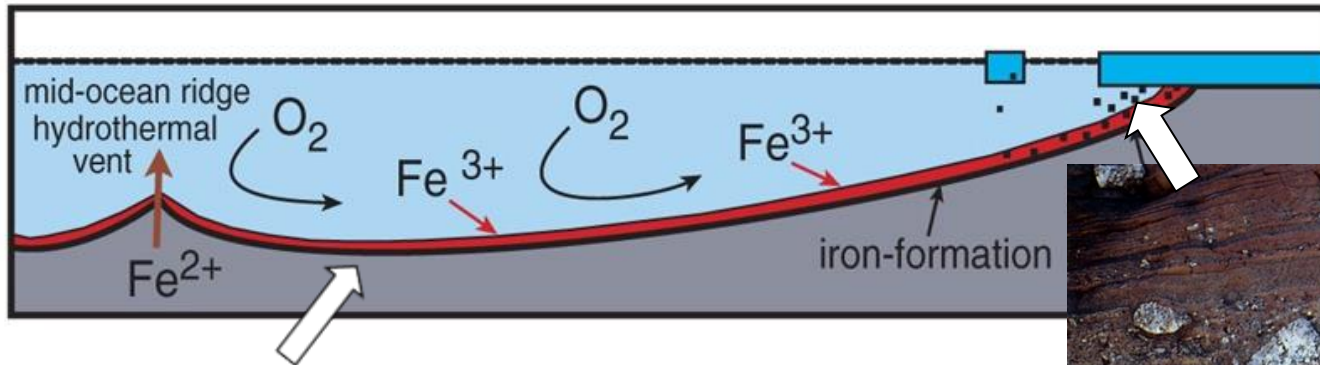


Les grandes glaciations : Terre « boule de neige »

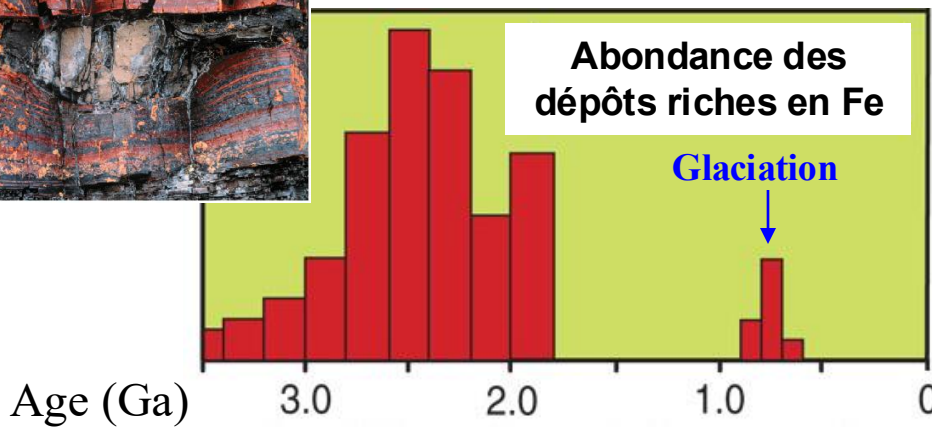


l'océan devient appauvri en O_2

à la fonte des glaces: ventilation des océans

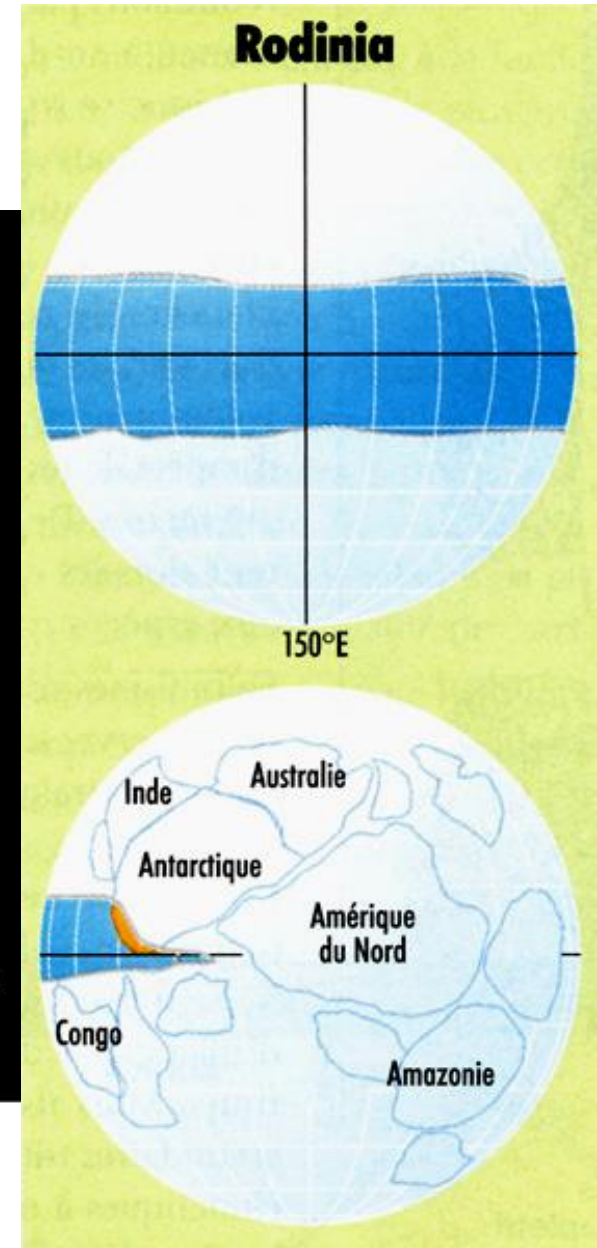
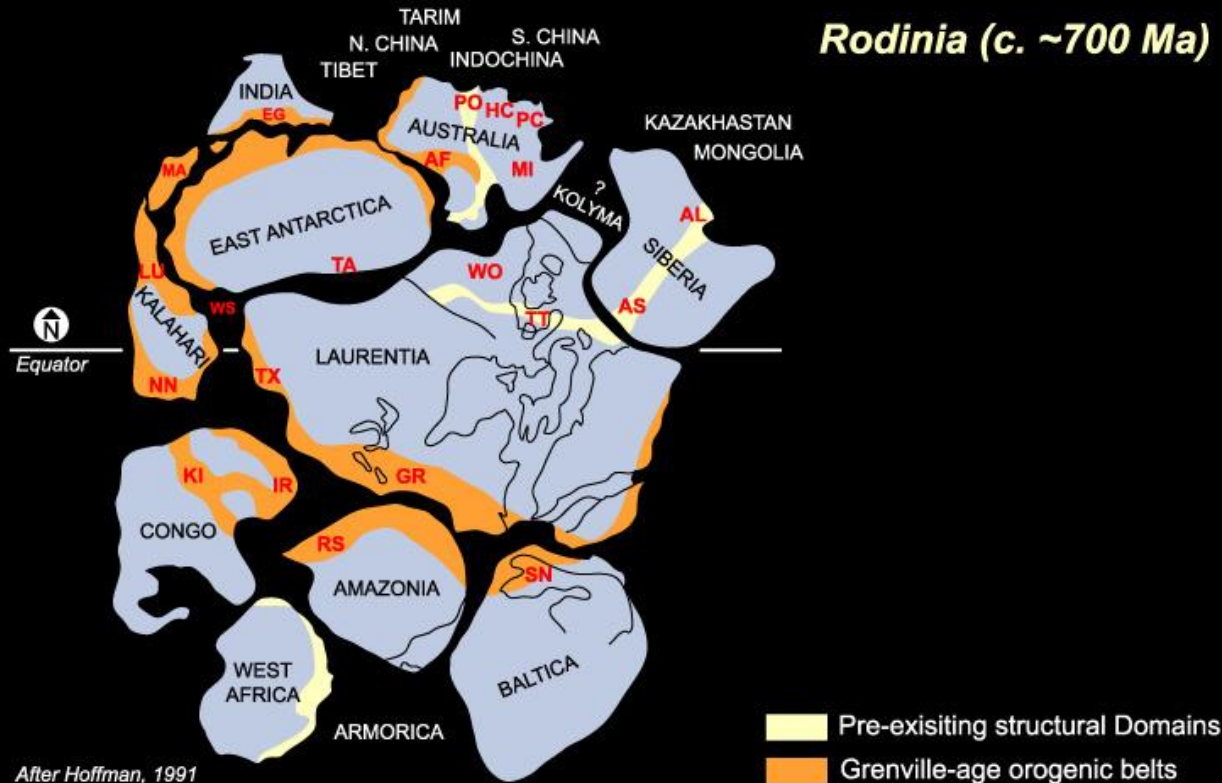


Tillites

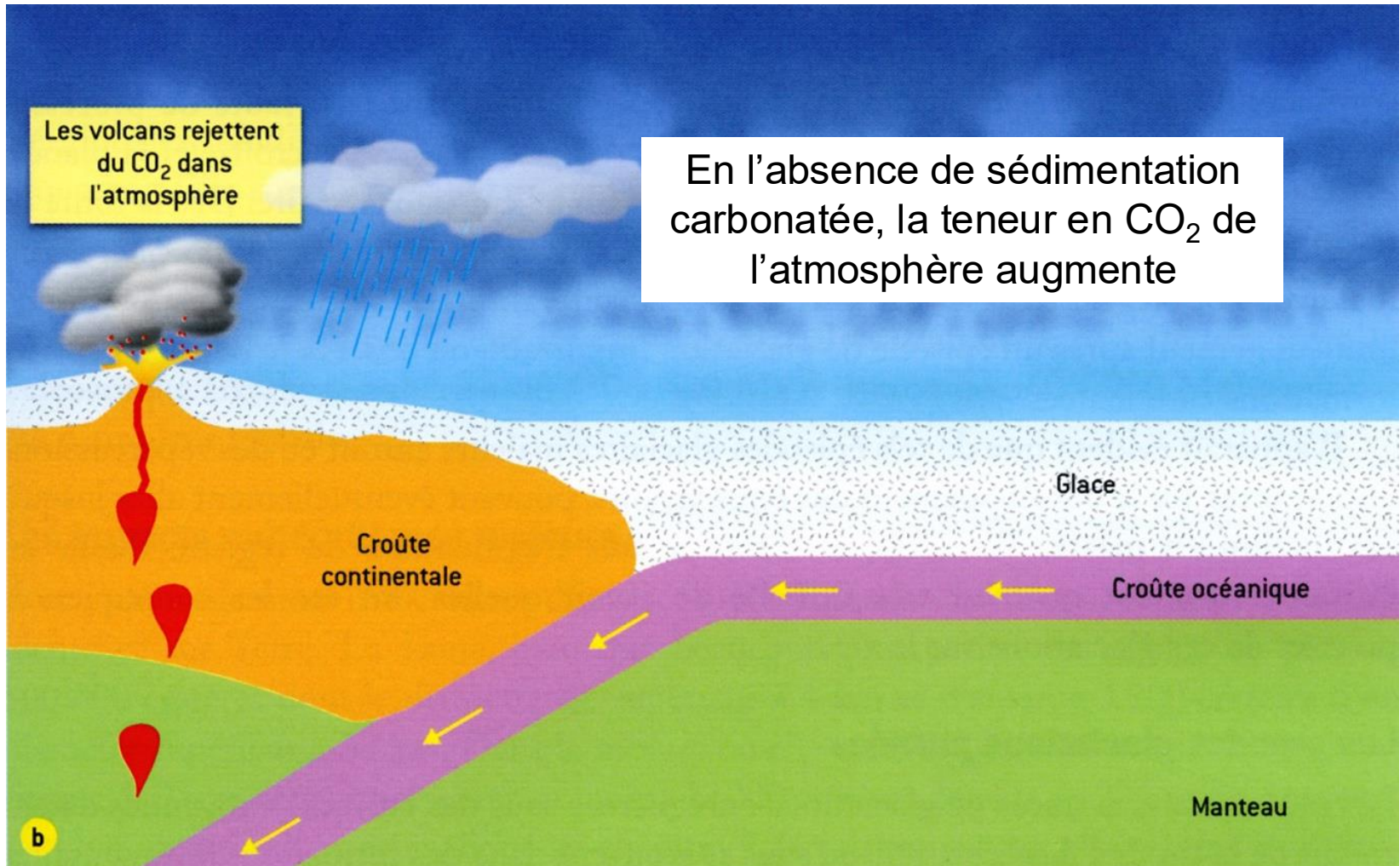


La glaciation de 700-750 Ma

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



Comment sortir d'une Terre enneigée ?



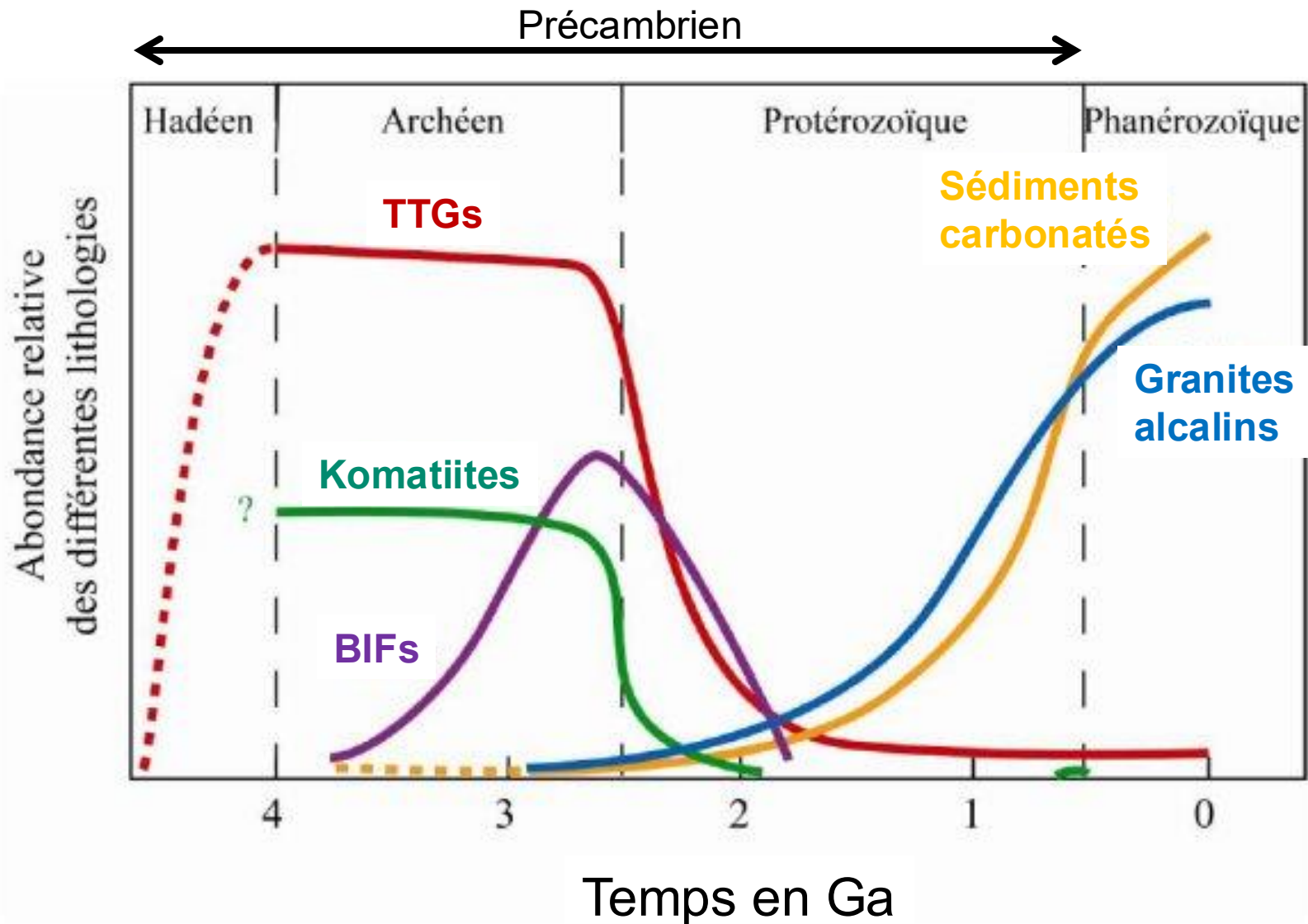
CO₂, effet de serre
et T augmentent



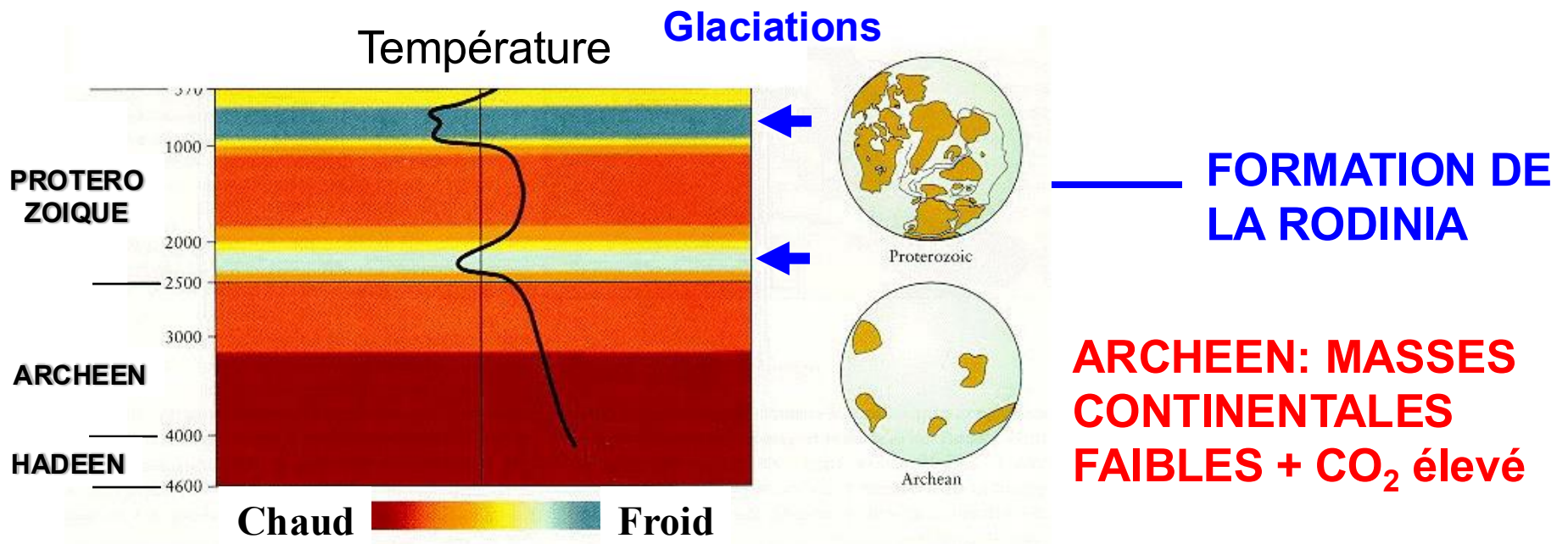
fonte des glaces

VIII. Synthèse

Abondance relative des différents types de roches



Evolution du climat au pré-Cambrien



VIII. Synthèse

Origine de la vie ?

Plus vieilles
roches
terrestres

Plus vieux
minéraux

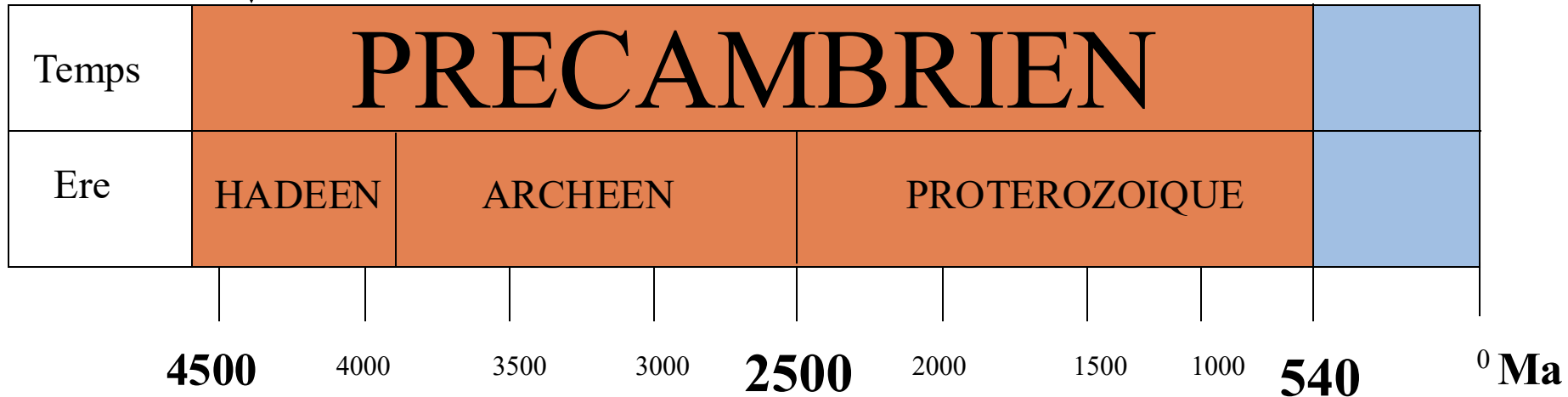
1^{ères}
bactéries
& algues

Oxygène dans
l'atmosphère

1^{ers}
supercontinents

1^{ers} organismes
pluricellulaires

?



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.