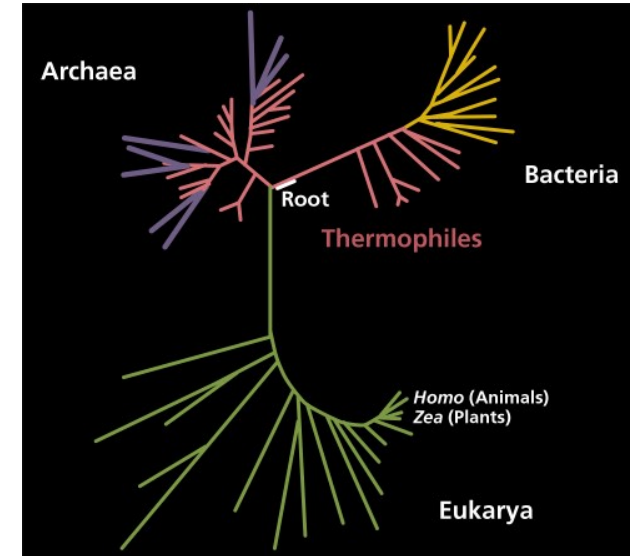




Exobiologie



Sébastien Rodriguez
Université Paris 7 / A.I.M.
sebastien.rodriquez@cea.fr

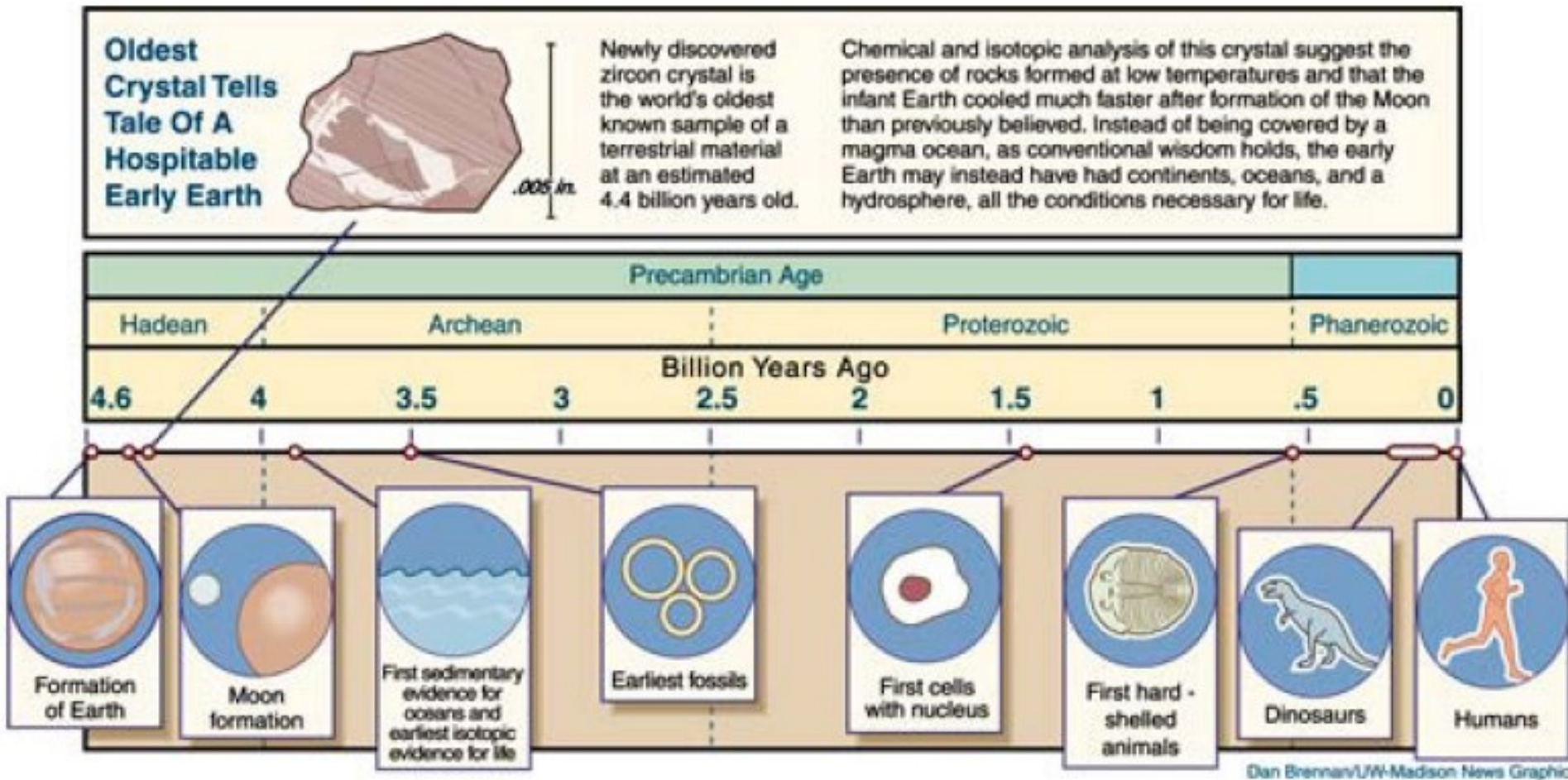




La vie sur Terre : un modèle à comprendre

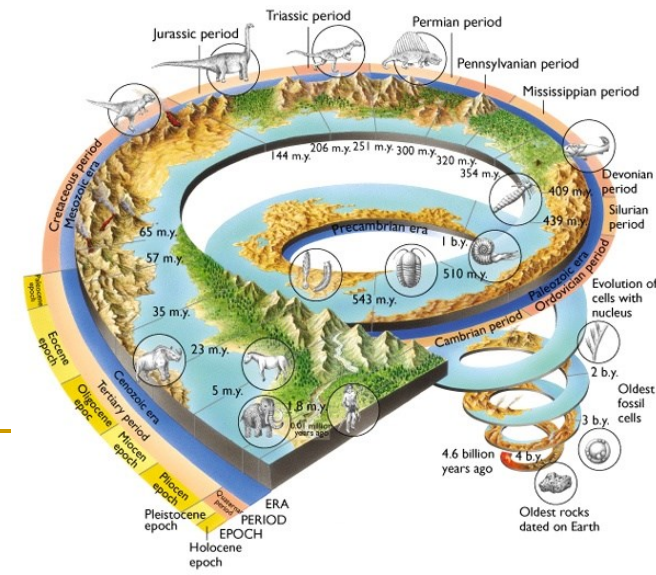
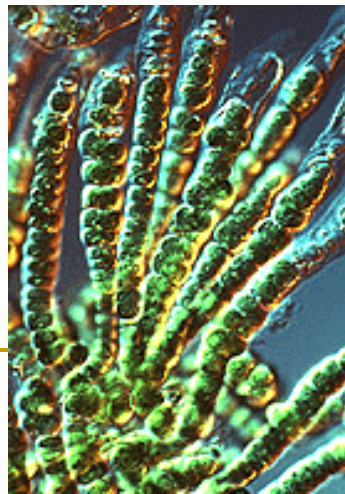
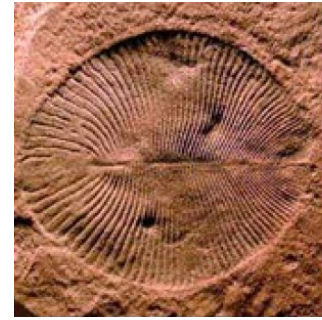


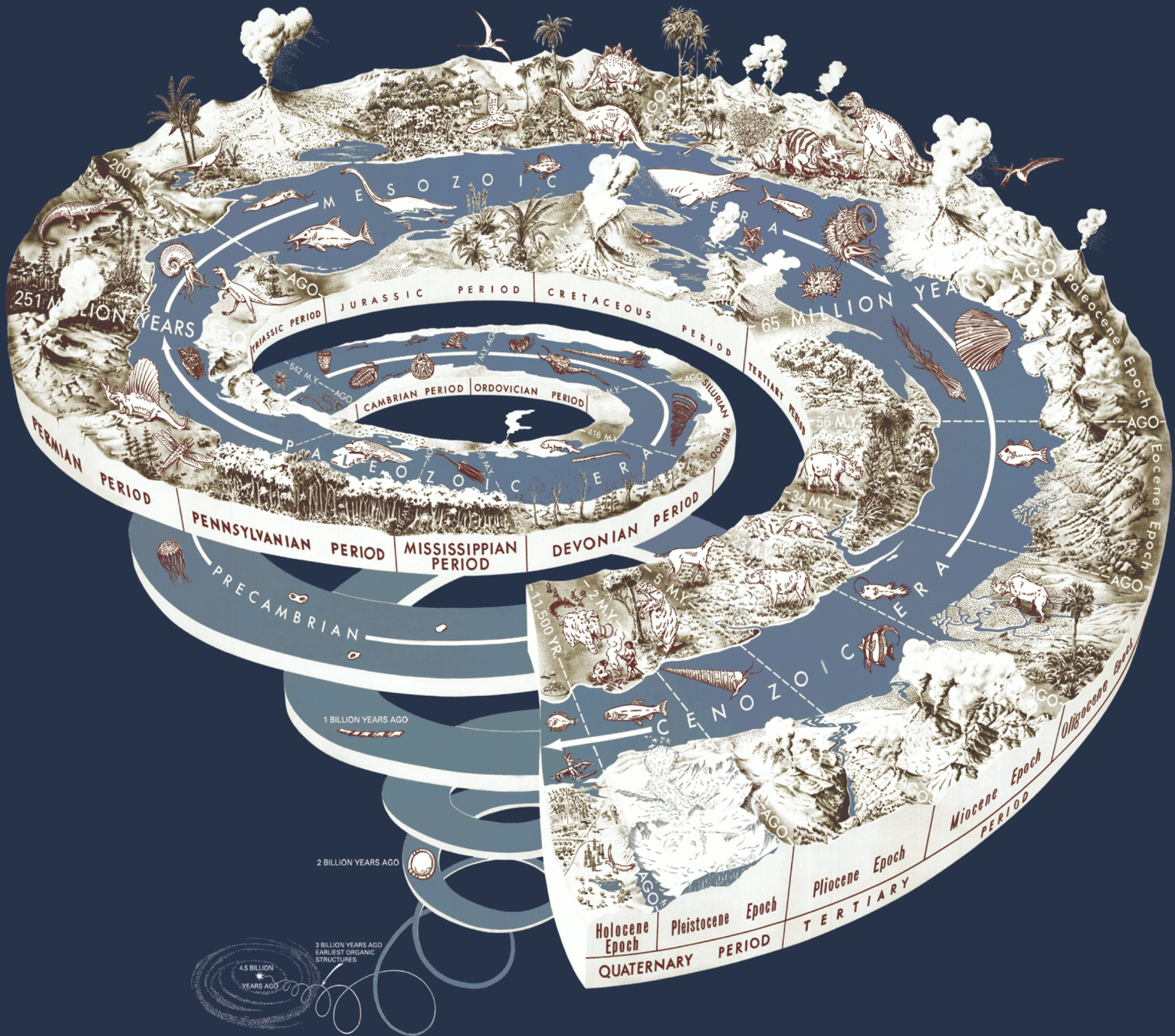
La Terre originelle



Sommaire

- Formation des océans et de l'atmosphère terrestre
- L'oxygène ?
- Définition de la vie ??
- Premières traces de vie sur Terre





Formation primitive de
l'atmosphère et des océans
(4.55 – 4 milliards d'années)

Enregistrements et marqueurs

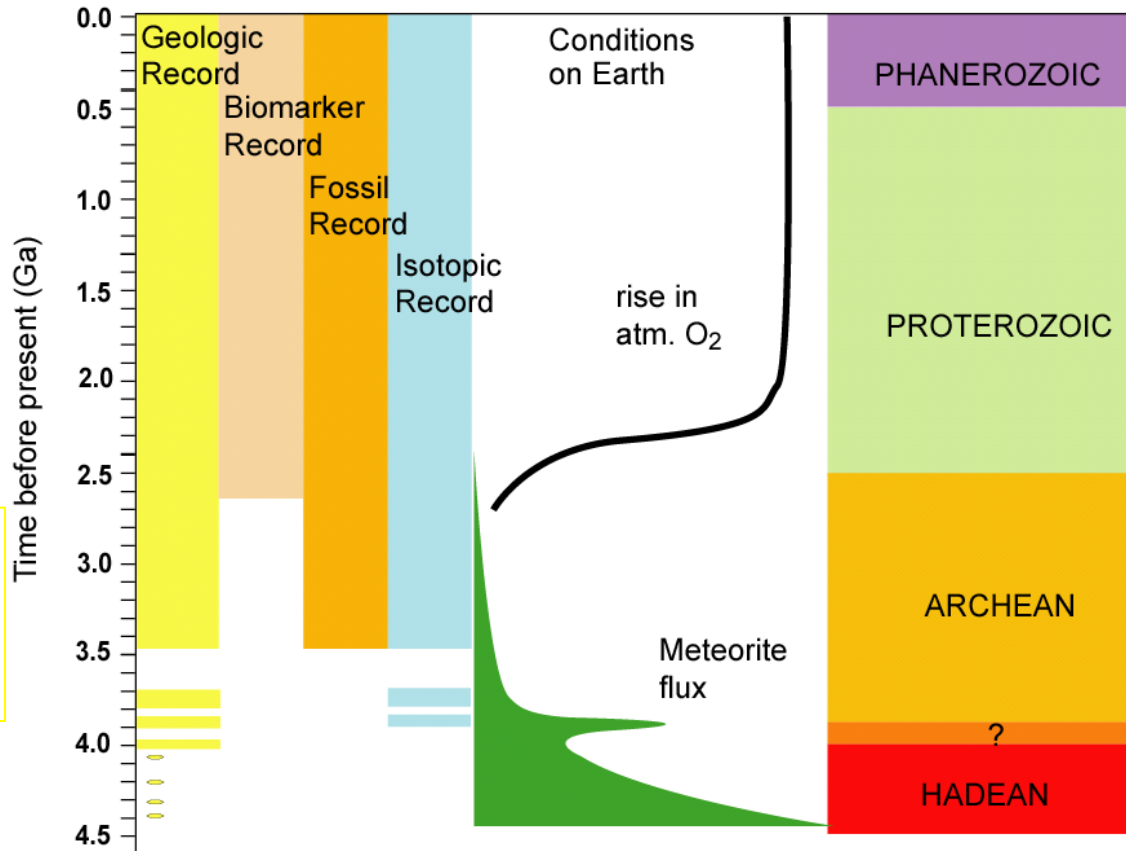


Données abondantes, Australie, Afrique du Sud notamment (3.5 – 3.2 Ga)

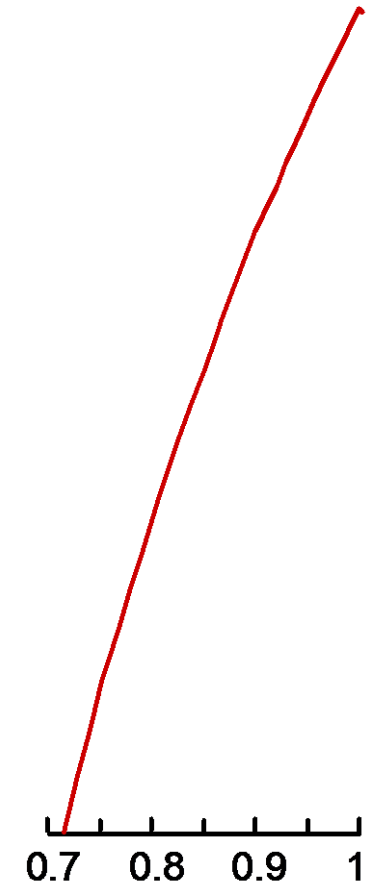
Roches de surface, Isua, Groenland (3.82 Ga)

Granitoïdes d'Acasta, Canada - magmas formés en présence d'H₂O (4.04 Ga)

Zircons de Jack Hills, Australie (4.4 – 4.0 Ga)



Un soleil originel beaucoup plus faible

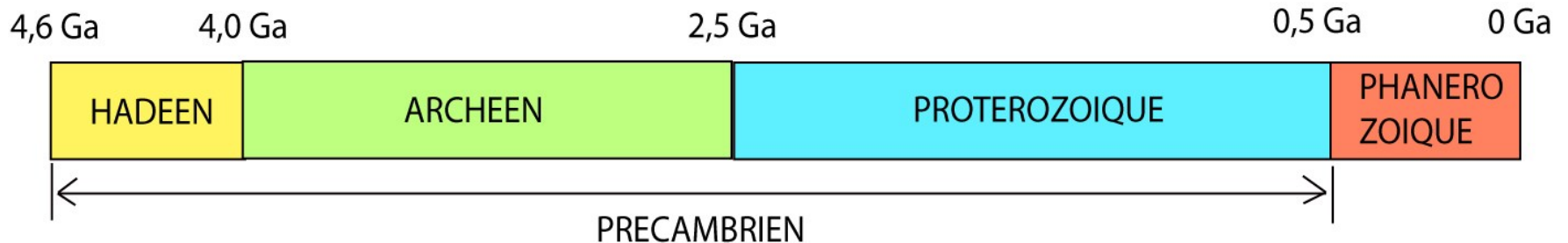


Avec la composition atmosphérique actuelle, la Terre aurait été complètement glacée

Luminosité solaire (proportion de sa valeur actuelle)

Indices ?

Le Précambrien constitue la période la plus longue du calendrier géologique terrestre (90 % en temps)



En raison de sa faible densité, la croûte continentale n'est pas recyclée.

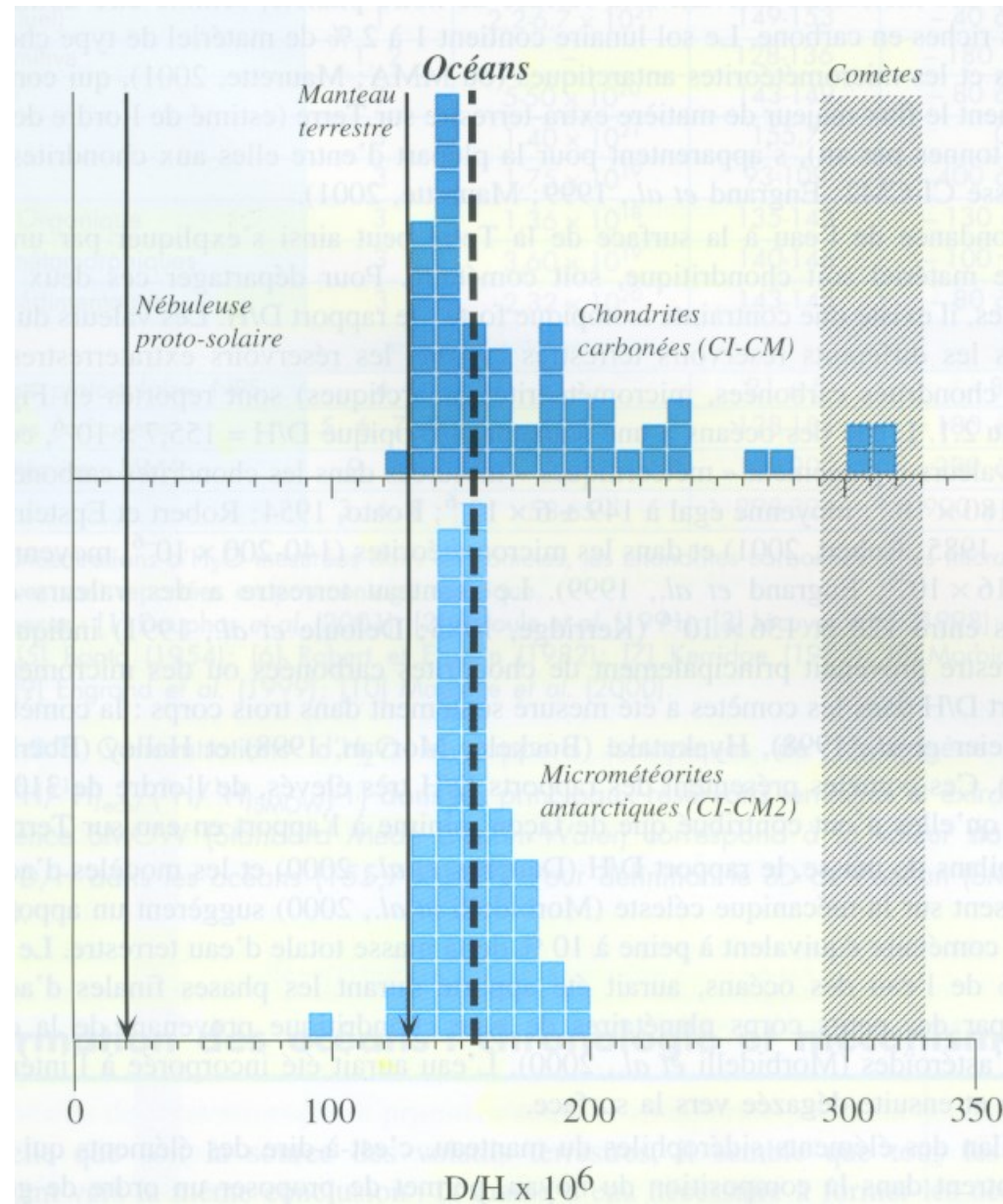
Elle constitue une archive de l'histoire ancienne de la Terre (géothermomètre (Ti) et géobaromètre (Al) $\Rightarrow$ conditions de P et T de formation de la roche – $\delta^{18}\text{O}$ dans les sédiments $\Rightarrow$ T de précipitation ...). Néanmoins, les terrains anciens sont rares.

Age en Ga	Formation	Pays	Roche mère
3,82	Gneissd'Aitsoq	Groenland	roche plutonique
3,865	Gneiss d'Isua	Groenland	roche sédimentaire
4,03	Gneiss d'Acasta	Canada	enclave
4,3	Narryer	Australie	zircon
4,404	Jack Hill	Australie	zircon

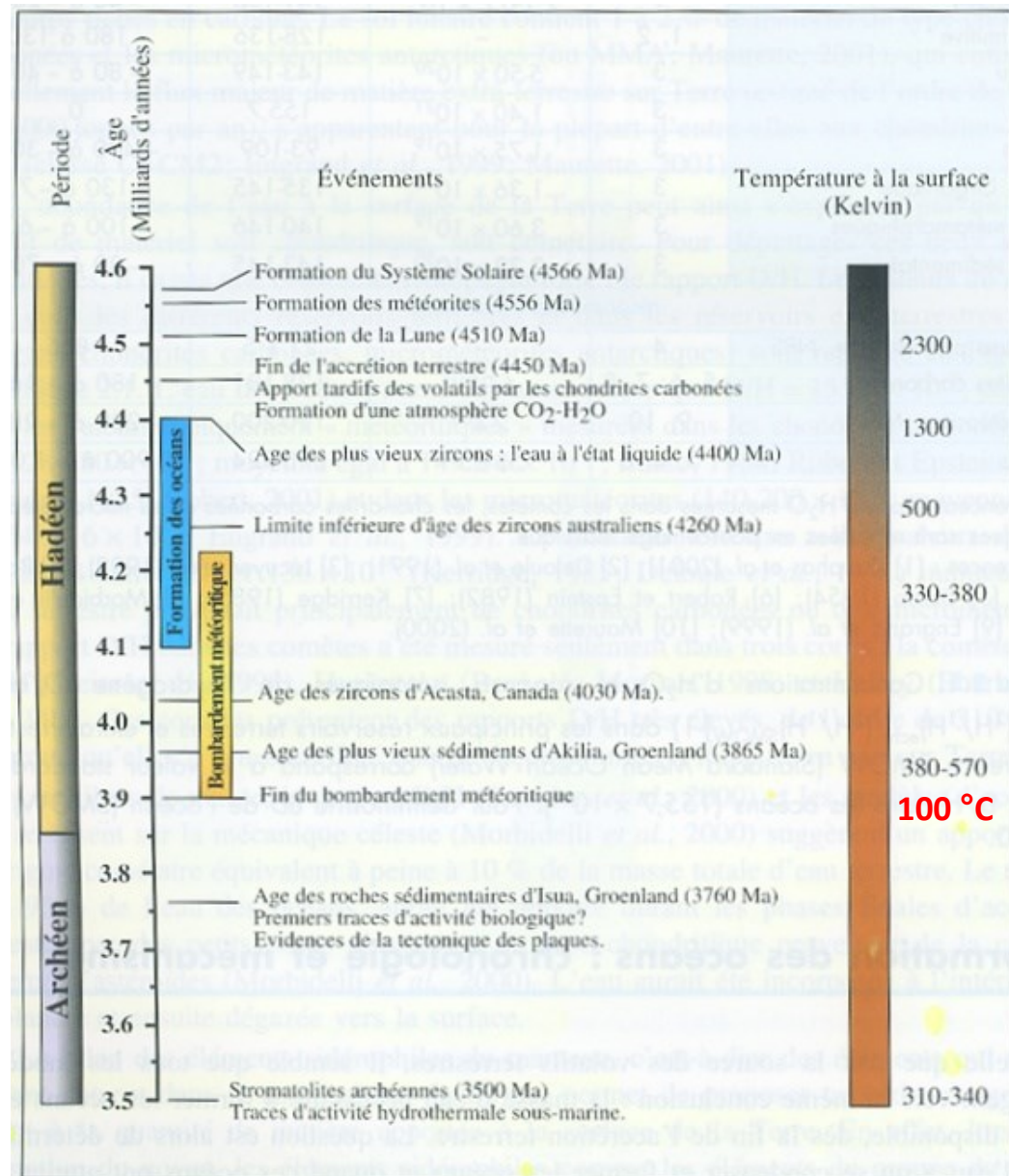
Origine de l'eau ?

■ Deux sources majeures :

- ❑ **dégazage de l'intérieur** de la Terre au moment de sa formation
- ❑ **Apport tardif de l'eau** durant les dernières phases d'accrétion de la Terre : météorites, micrométéorites, comètes
- ❑ Origine composite de l'eau (contribution des comètes ≈50%)



Chronologie des évènements qui ont mené à la formation de l'atmosphère primitive et des océans



Chronologie des événements qui ont mené à la formation de l'atmosphère primitive et des océans

Formation des premiers océans

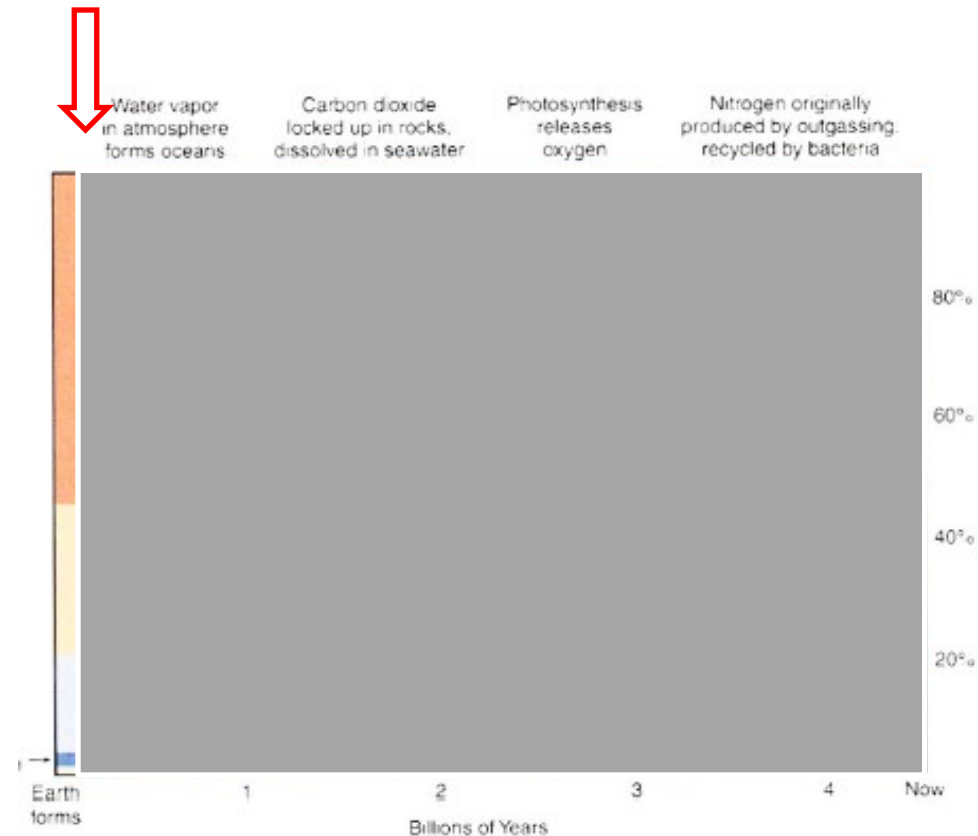
Il y a 4,55 milliards d'années :

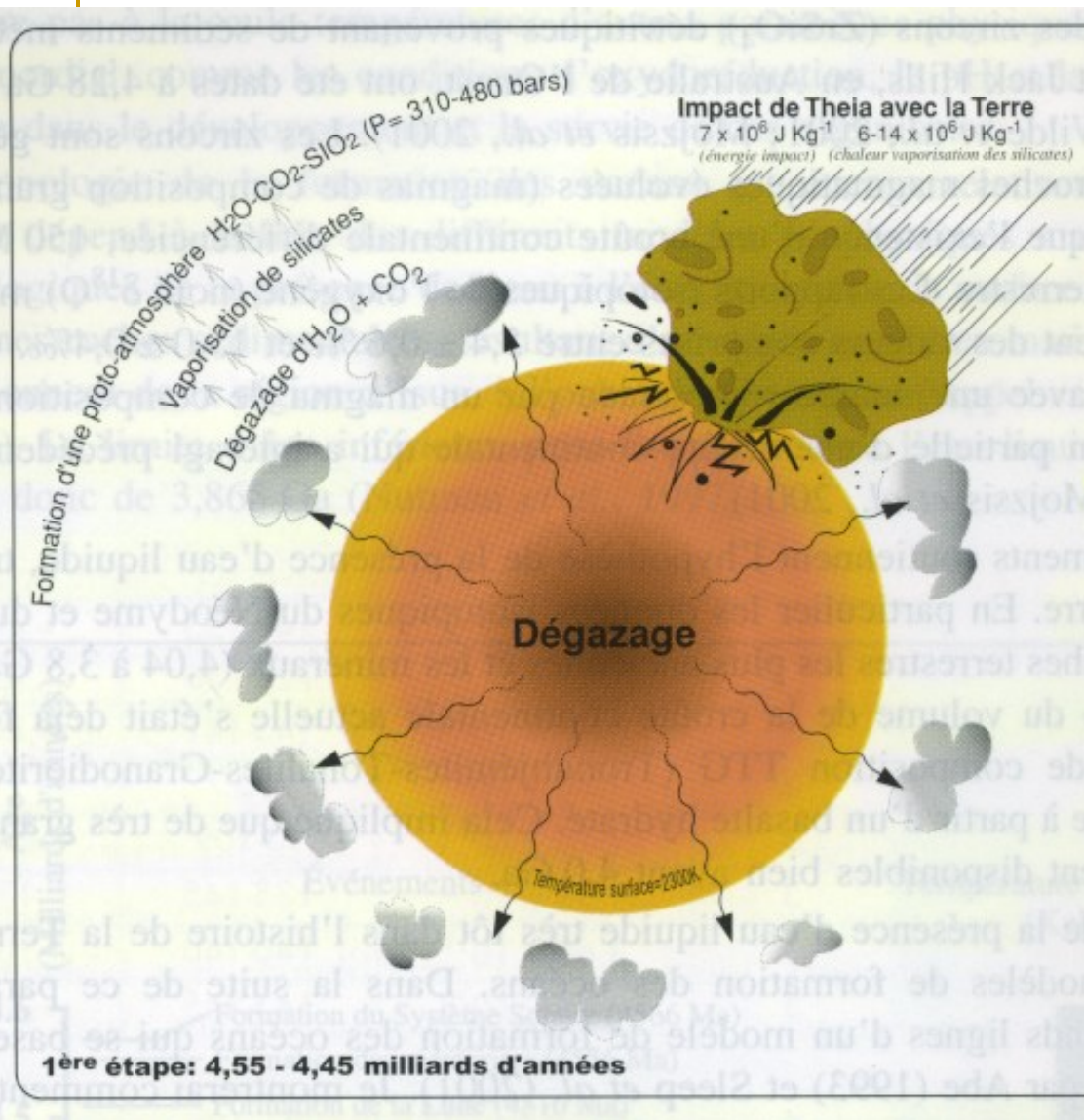
- agglomération : agrégation de blocs de roches, de poussières, de grains de silicates, de glace et de molécules de gaz (embryons des planètes)
- accréition : formation des planètes dont la Terre primitive avec une atmosphère pre-primitive de H et He (échappement rapide, Terre non différenciée, pas de champ magnétique)

Entre 4,55 et 4,4 milliards d'années :

- différenciation : sous l'effet de la chaleur de l'accréition, le cœur fond, un noyau liquide se forme $\Rightarrow$ entouré d'un océan de magma ?
- atmosphère primitive « secondaire » : bombardement météoritique + chaleur dégagée par le manteau $\Rightarrow$ dégazage des roches + apports extérieurs qui forment une atmosphère primitive « secondaire » extrêmement épaisse et dense de CO_2 - H_2O - N_2 - SO_2 (plusieurs centaines de bars) principalement (même composition que les éruptions volcaniques d'aujourd'hui)
- perte importante de cette atmosphère lors de la formation de la Lune (4,4 milliards d'années) + échappement
- baisse de la T° progressive $\Rightarrow$ cœur solide/liquide $\Rightarrow$ protection de l'atmosphère secondaire par champ magnétique
- condensation : formation des premiers océans

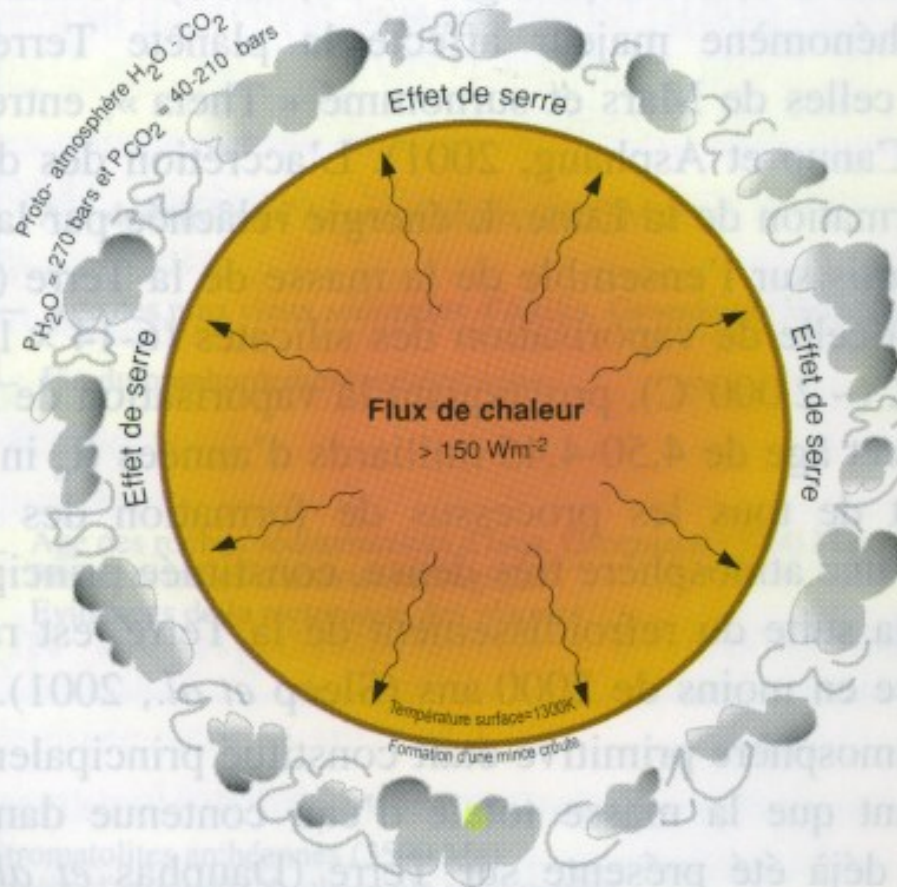
L'oxygène n'est présent qu'à l'état de traces. Sa concentration commence à augmenter il y a environ 2,5 milliards d'années, parallèlement à la diminution de la concentration du CO_2 .





- Collision corps $\approx$ Mars avec Terre $\Rightarrow$ Lune
- $T^\circ \text{ surface} > 2300 \text{ K} \Rightarrow$ vaporisation de la surface et des silicates
- Formation d'une atmosphère très dense : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- Comment cette atmosphère a-t-elle pu disparaître ?
- atmosph. se condense très rapidement

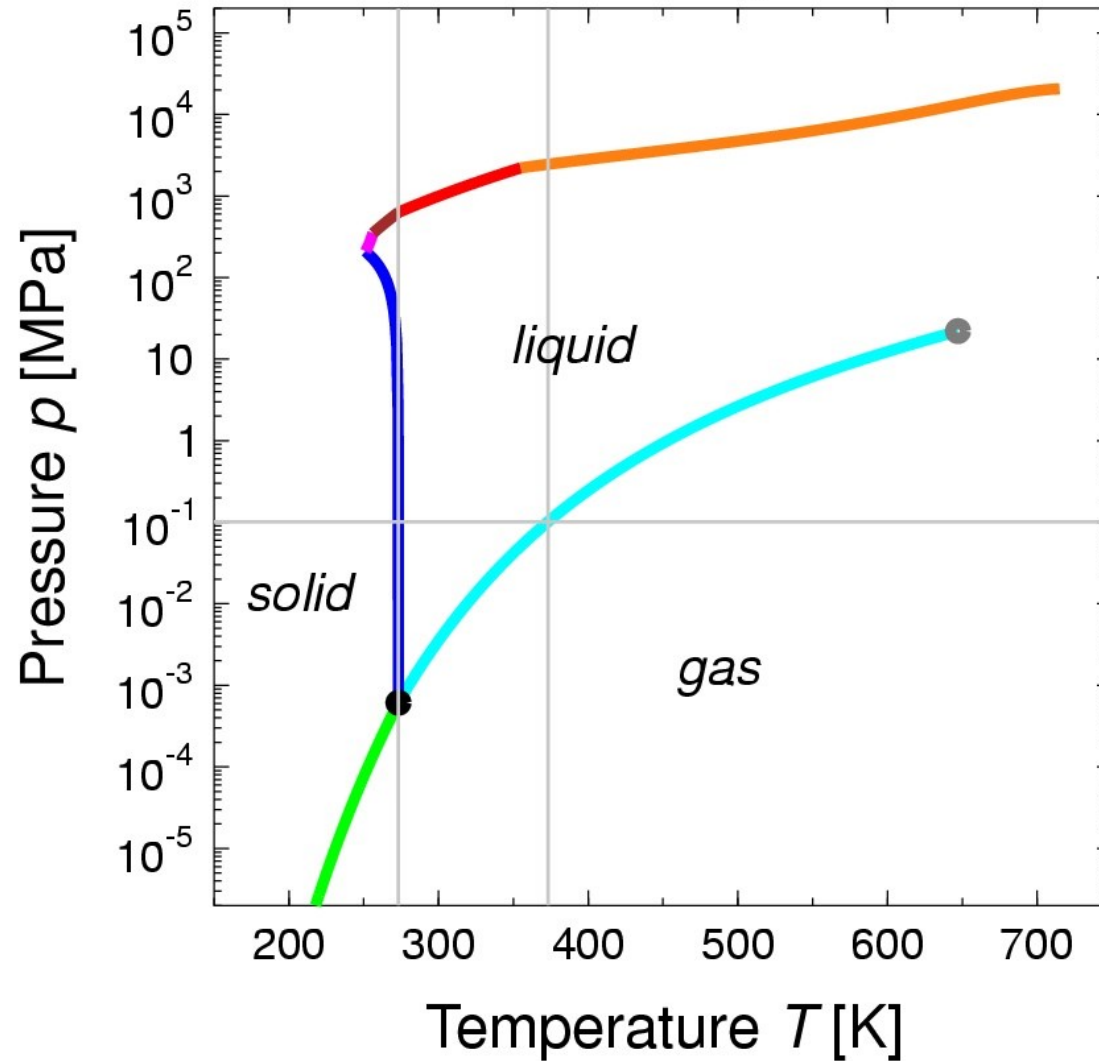
Du début de l'accrétion à la ségrégation du noyau et à la fin du dégazage.

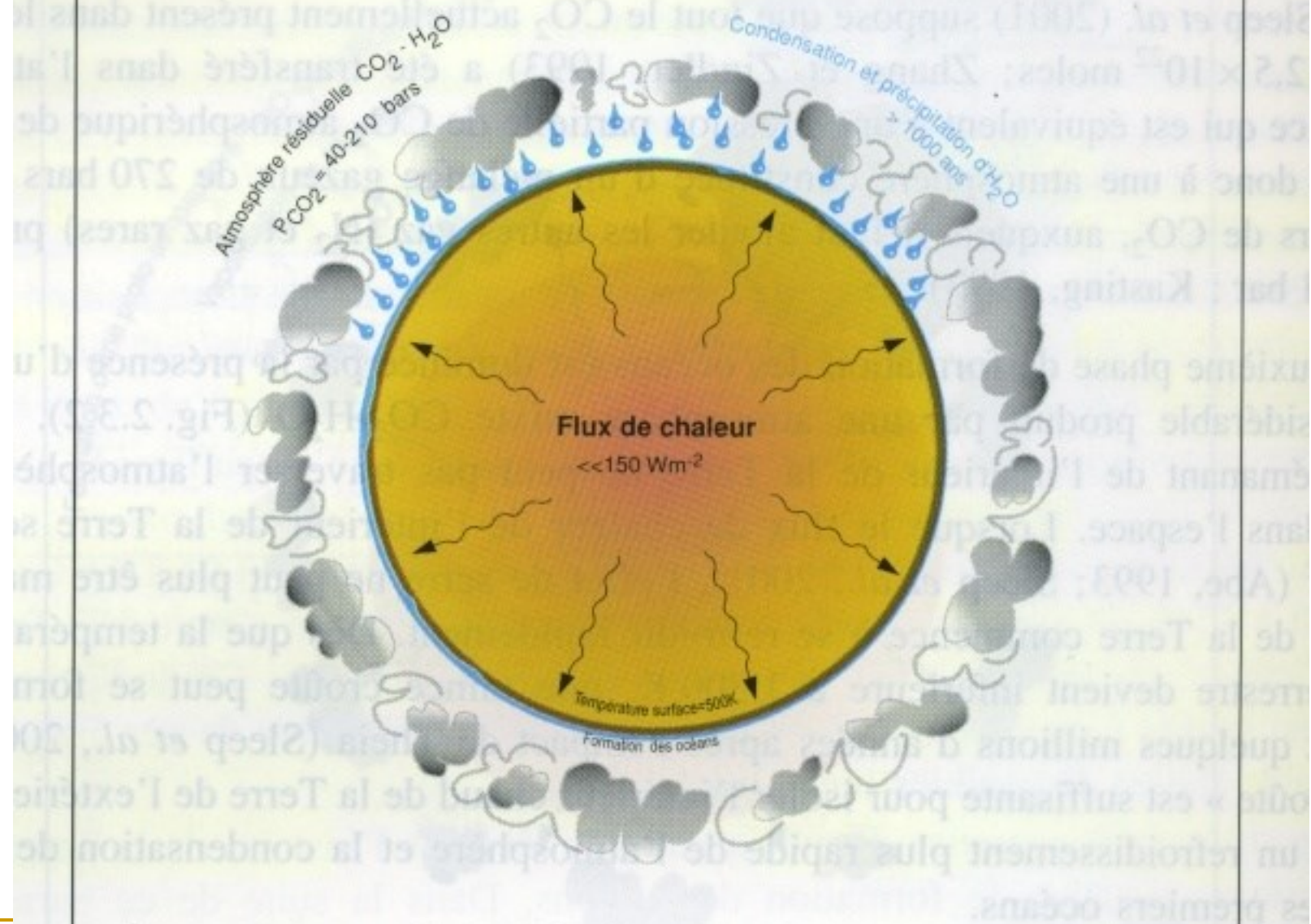


- Effet de serre considérable produit par atm. CO₂/H₂O
- Conservation de l'énergie radiative émise par la Terre
- Qd Flux $Q < 150 \text{ W/m}^2$, la Terre peut se refroidir
- Temp surf $< 1300^\circ\text{C}$
- Formation d'une croûte fine en qq Ma $\Rightarrow$ bouclier conducteur
- Isolation de l'intérieur de la Terre $\Rightarrow$ temp. surface chute $\Rightarrow$ condensation atm $\Rightarrow$ formation océans

2ème étape: 4,45 (t_0) $\pm$ 2,5 millions d'années

Phase Diagram of Water





3ème étape: 4,40-4,30 milliards d'années?

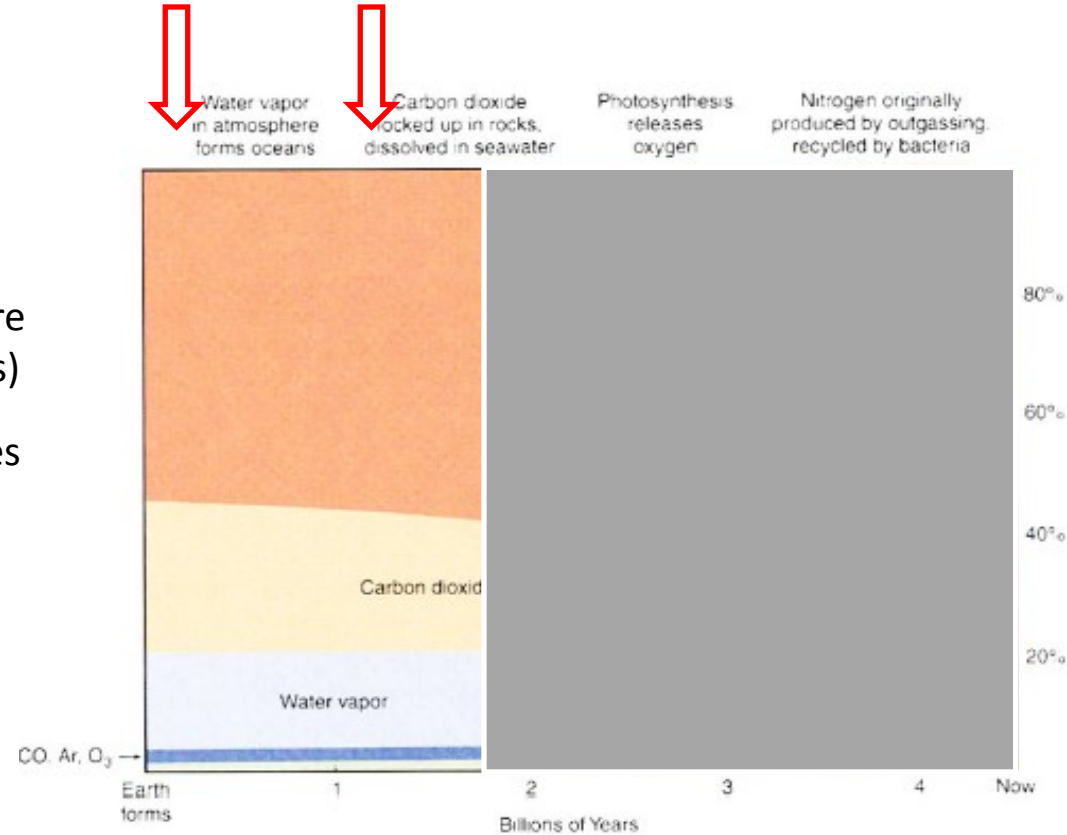
Et après ?

Formation des premiers océans

Précipitation des carbonates

Entre 4,4-4,3 et ≈2,5 milliards d'années (Hadéen + Archéen) :

- fin de la condensation de l'atmosphère
- apport d'H₂O par le bombardement cométaire et météoritique (jusqu'à 3,9 milliards d'années)
- composition de l'atmosphère reste à peu près constante : 60 % N₂, 20% CO₂ et 20% d'H₂O
- température de surface baisse jusqu'à être comprise entre 0° et 100°C (eau liquide)
- premières réactions d'altération des roches de surface avec l'atmosphère et l'eau liquide : formation de carbonate de calcium

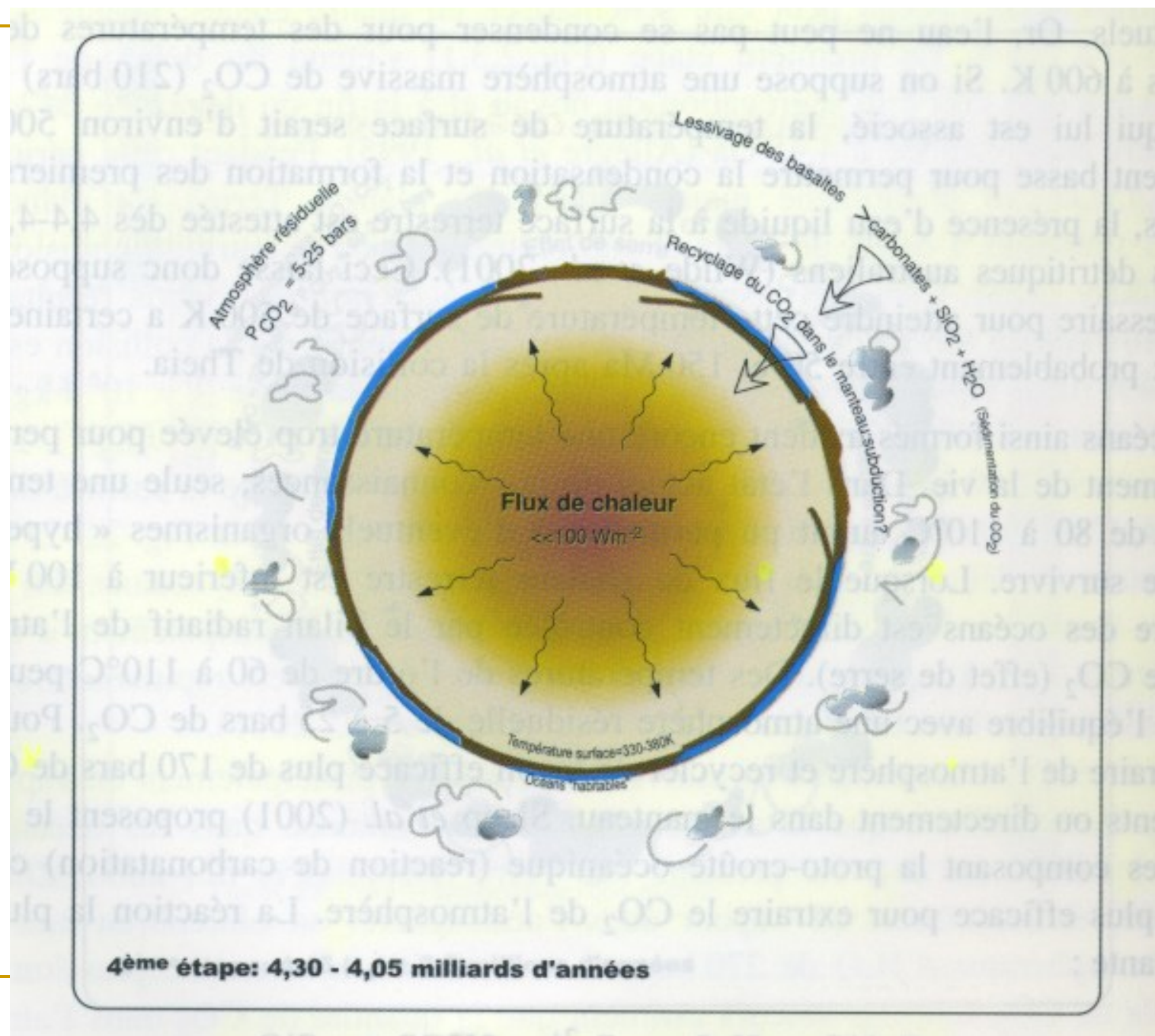


Minéral (silicate) + eau + CO₂ ↔ minéral d'altération (argile) + Ca²⁺ + HCO₃⁻

Ca²⁺ + 2 HCO₃⁻ → CaCO₃ + H₂CO₃ (carbonate + acide carbonique)

- précipitation des carbonates au fond des océans (très peu solubles dans l'eau)
- tectonique ⇒ piégeage partiel des carbonates (*i.e.* eau + CO₂) dans le manteau par subduction (cf. Zircons de Jack Hills)

On passe de plusieurs dizaines de bars de CO₂ à ≈< 1-5 bar (3.5 milliards d'années – enregistrements géologiques)



En résumé

- Terre primitive : très chaude !! (chaleur due à collision, compression, radioactivité, ...)
 - Conséquence : volcanisme, T° surface trop élevée pour eau liquide
 - Perte de l'atmosphère pre-primitive (H₂, He), différent de Jupiter et Saturne par exemple
 - Refroidissement : condensation de l'eau, accumulation d'une nouvelle atmosphère (atmosphère primitive « secondaire ») due au dégazage
-

En résumé : l'atmosphère pre-primitive

- Composition – Probablement H_2 , He
- Ces gaz sont relativement rare sur Terre, comparativement à d'autres endroits de l'Univers. Ils ont été perdus vers l'espace à cause de :
 - ❑ Gravité terrestre pas suffisante pour retenir les gaz légers
 - ❑ Terre non différenciée. Cœur solide/liquide créant le champ magnétique terrestre n'existait pas. Pas de déflexion des rayons solaire et cosmiques.
- Après différenciation; la Terre conserve éléments lourds

En résumé : l'atmosphère primitive Archéenne

- Produit par le dégazage des volcans – eau + CO₂ dominant
- Gaz étaient similaire à ceux créés par les volcans modernes (H₂O, CO₂, SO₂, CO, S₂, Cl₂, N₂, H₂ ...) et NH₃ (ammoniac) and CH₄ (méthane)
- Fortes pressions et effets de serre intenses, puis disparition rapide CO₂ (carbonates) et H₂O (premiers océans) ⇒ (P,T) ↓
- Formation continue des océans quand la Terre se refroidit au début de l'Archéen (env. 4 milliards d'années) ⇒ (P,T) ↓
- Très peu d'O₂ sur Terre primitive (traces) ⇒ Pas d'Ozone (O₃) ⇒ pas de protection UV du vivant (en surface !)

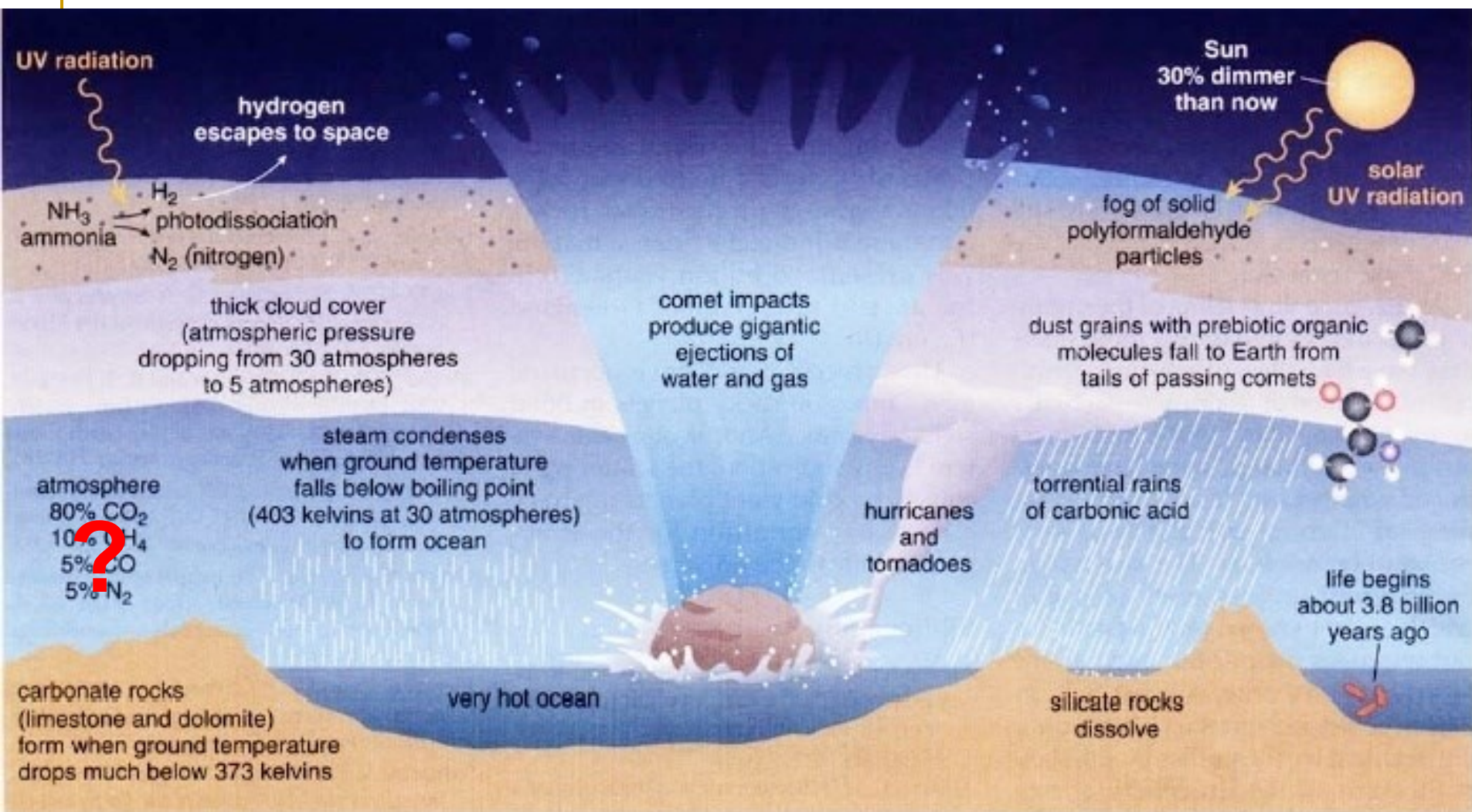


Figure 11. The primeval biosphere awoke to a tempestuous world of intermittent comet impacts, a steaming-hot ocean, a very thick atmosphere and torrential acid rains. Giant comet impacts would have ejected large amounts of material into space and spun off violent hurricanes and tornadoes. Although the atmosphere was originally rich in carbon dioxide (CO_2), photodissociation would have gradually increased the proportion of nitrogen in the atmosphere, while releasing hydrogen into space. Silicate rocks, dissolved by the acidic rain, would have been gradually replaced by carbonate rocks. Prebiotic organic molecules, delivered by the comets, would have provided the "seed" for the evolution of the first life.