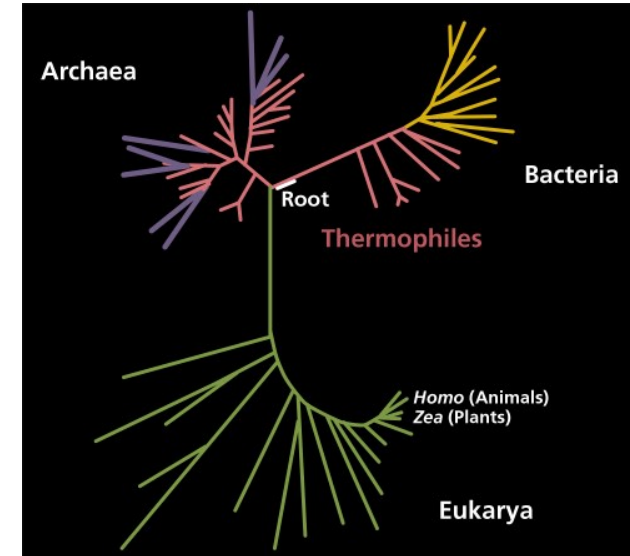




Exobiologie



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



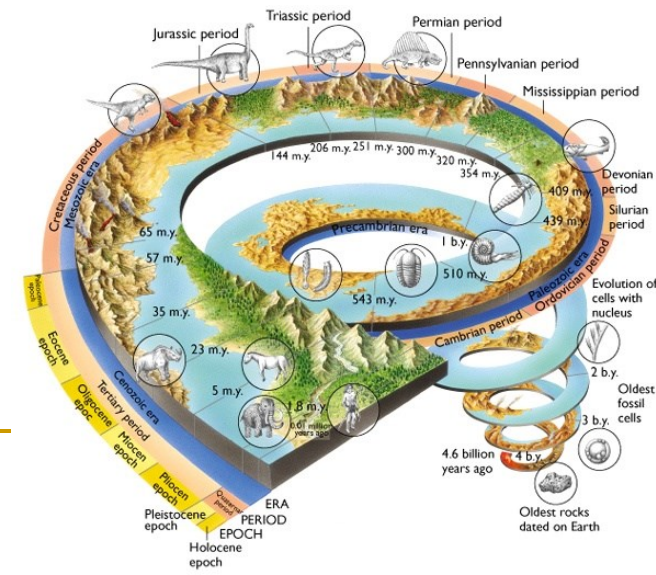
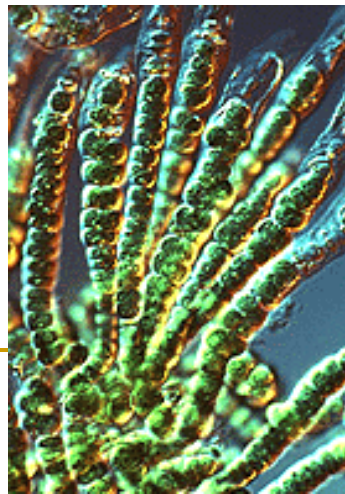
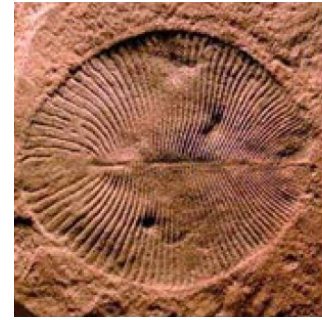


La vie sur Terre : un modèle à comprendre



Sommaire

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



De l'atmosphère Archéenne à l'atmosphère actuelle : l'essor de l'O₂

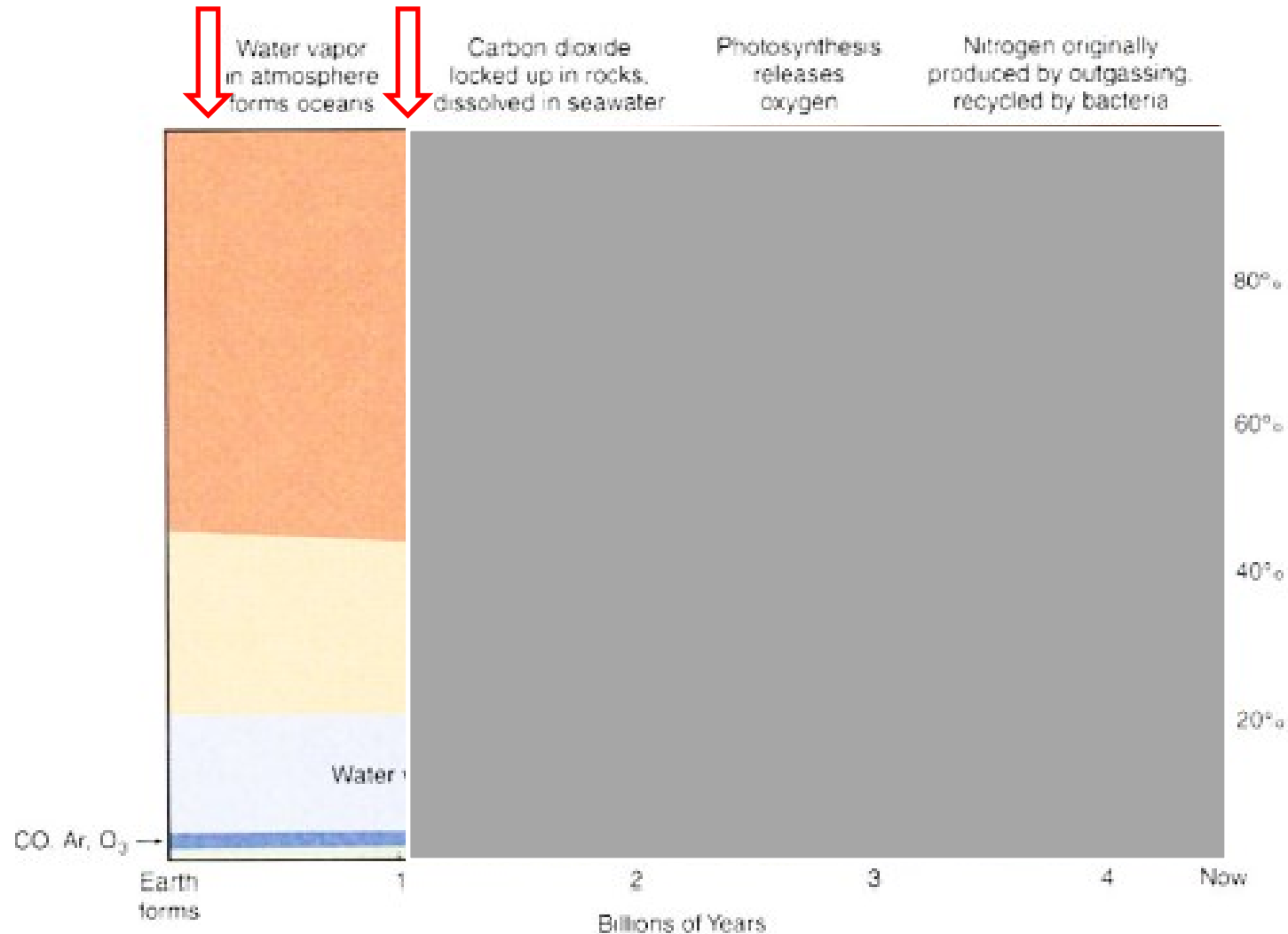
Bilan au début de l'Archéen (env. 4 Ga)

- Composition de l'atmosphère : env. 60 % N_2 , 20% CO_2 et 20% d' H_2O + traces de O_2 , CH_4 , NH_3 , SO_2 ...
- Pression atm. (surface) = env. 1 bar
- Effet de serre suffisant pour maintenir la température en surface = 0-100°C (eau liquide), malgré la faible luminosité solaire de l'époque
- Température océans = env. 60°C
- Tectonique active
- Piégeage continu du CO_2 atmosphérique sous forme de dépôts sédimentaires de carbonates
- Libération continue du CO_2 du manteau par volcanisme

MAIS, bouleversement majeur à partir de 2.2 Ga !!
(début du Protérozoïque)

Formation des premiers océans

Précipitation des carbonates



**Formation des
premiers océans**

**Précipitation des
carbonates**

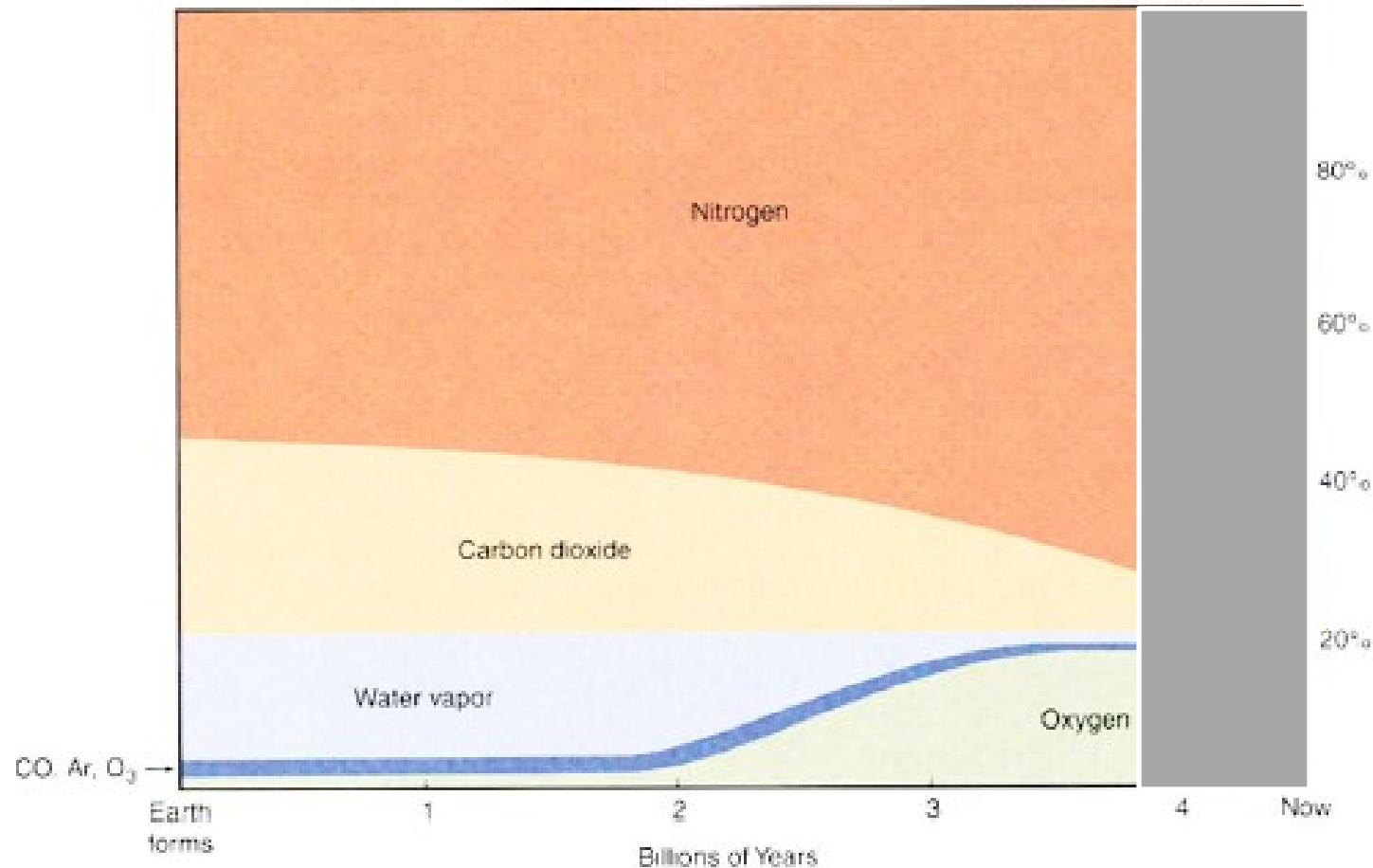
**Essor
de l'O₂**

Water vapor
in atmosphere
forms oceans

Carbon dioxide
locked up in rocks,
dissolved in seawater

Photosynthesis
releases
oxygen

Nitrogen originally
produced by outgassing,
recycled by bacteria



Ajout de la contribution de l'O₂

- Aujourd'hui : O₂ = 21%

- **Production d'O₂ ?**

- Dissociation photochimique de H₂O par UV : oui, mais faible production (1 à 2% des niveaux actuels) ⇒ formation d'une mince couche d'O₃

- Photosynthèse par les cyanobactéries (ou autres) :

CO₂ + H₂O + lumière → composés organiques (C - carbone) + O₂

⇒ **seul mécanisme capable de produire de l'O₂ en masse**



- **Destruction O₂ :**

- 1. « lessivage » chimique dans un environnement très réduit (oxydation très efficace des roches de surfaces)
- 2. Si le C produit par photosynthèse reste libre, la respiration consomme le C et l'O₂ libéré pour les recombinaison naturellement en CO₂ (réaction inverse de la photosyn.)

- **Problèmes :**

- 3. Restait-il suffisamment de CO₂ dans l'atmosphère Archéenne pour produire l'O₂ aujourd'hui observé (cf. photosynthèse)
- 4. Cyanobactéries actives depuis 3.5 Ga : retard de l'essor de l'O₂ de 1.3 Ga ??

Problèmes n°2 & 3 : piégeage du C et quantité de CO₂ disponible ? Problèmes résolus !

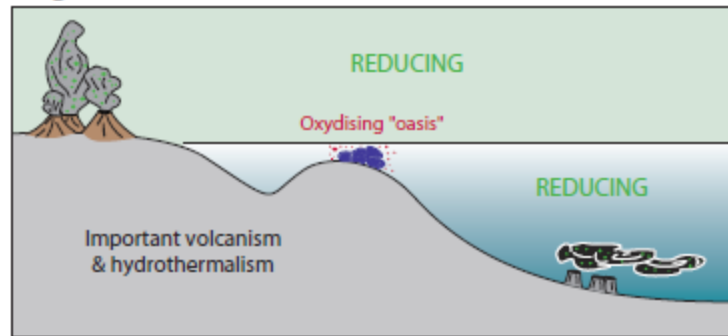
- Problème n°2 : si le C créé par photosynthèse n'est pas piégé, il est immédiatement dégradé par la réaction inverse (respiration)
 - Enregistrements géologiques : changement important de style géologique autour de 2.5-2.3 Ga (compositions des laves ...)
 - Le refroidissement de la Terre est alors suffisant pour la mise en place d'une « vraie » tectonique des plaques – chute brutale de l'activité volcanique et géothermale
 - Création des marges passives et des plateformes continentales (continents stables) : transition plaque océanique et plaque continentale sans subduction (épaule du rift qui a ouvert un océan)
 - Le C résultant de la photosynthèse est piégée dans les sédiments, maintenant « stockés » de façon stable

- Problème n°3 : certains scénarii prévoient une très faible teneur atm. en CO₂ au début de l'Archéen, pas assez pour produire tout l'O₂ nécessaire par photosyn.
 - CO₂ atmosphérique en équilibre dynamique entre ses « sources » (volcans) et ses « puits » (précipitation des carbonates et photosynthèse)
 - CO₂ continuent réalimenté par les volcans

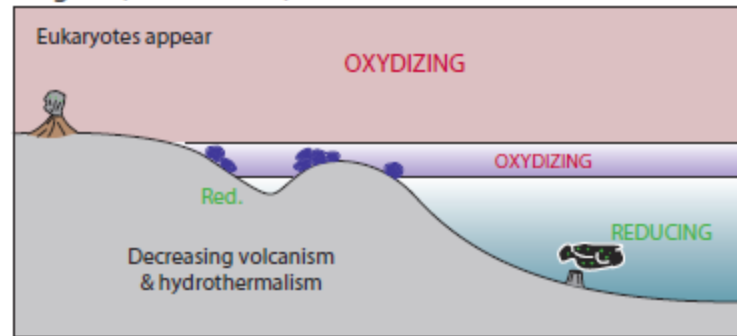
Problèmes n°1 & 4 : lessivage et retard de croissance de l'O₂

- Aujourd'hui: O₂ = 21%
- Pendant tout l'Archéen : absence d'O₂ dans l'atmosphère à cause du lessivage. Quand toutes les roches de surface sont suffisamment oxydées, possibilités de garder une atmosphère d'O₂.
 - ⇒ « oxydation progressive de réservoirs réduits »

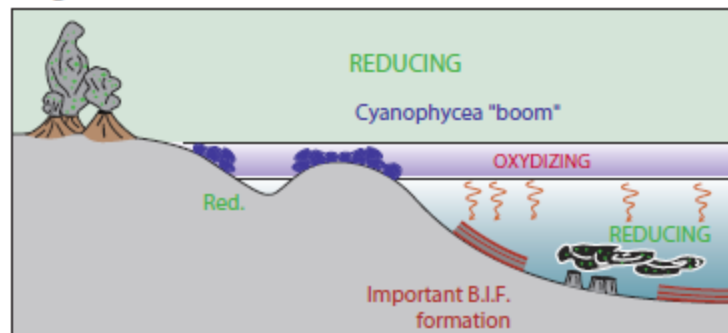
Stage I (4.1 - 2.7 Ga ?)



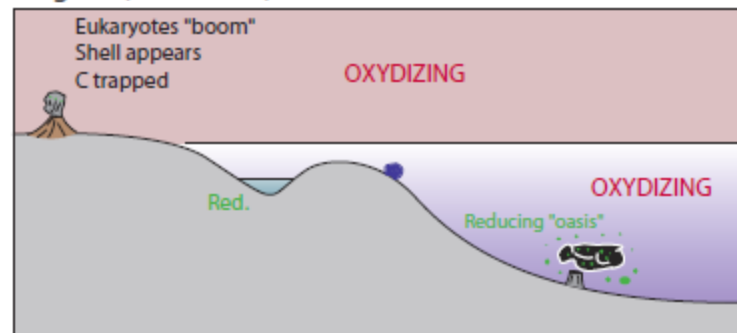
Stage III (2.2 - 0.6 Ga ?)



Stage II (2.7 - 2.2 Ga ?)

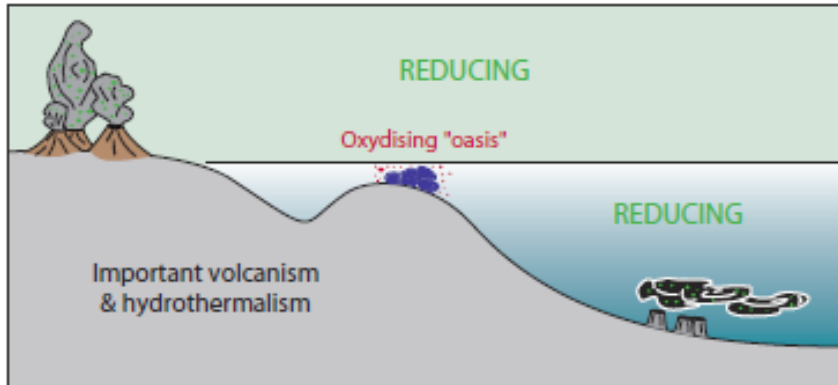


Stage IV (0.6 - 0 Ga ?)

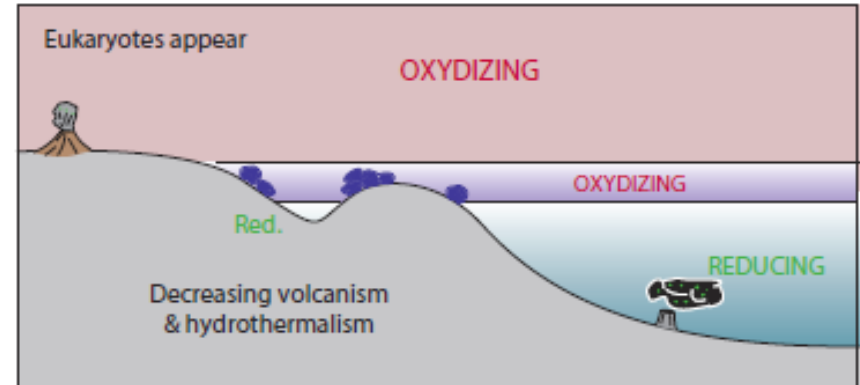


Oxydation progressive de réservoirs réduits

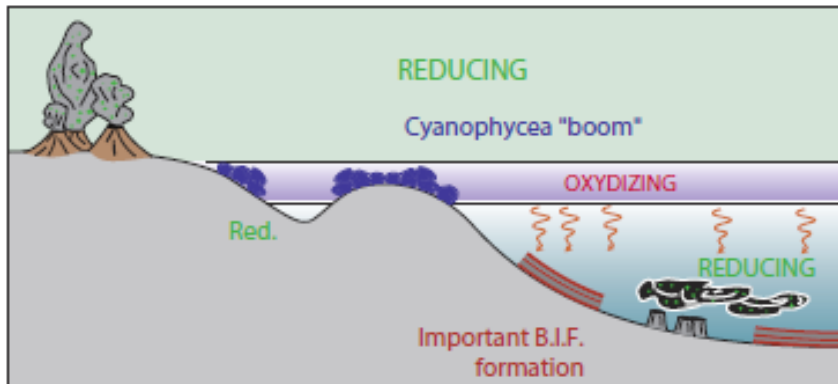
Stage I (4.1 - 2.7 Ga ?)



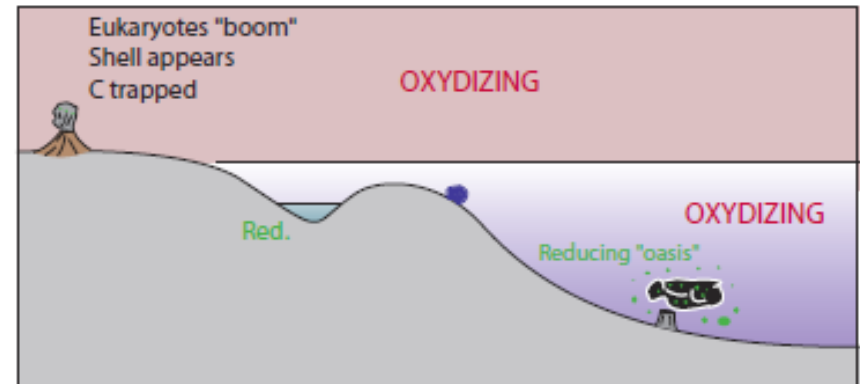
Stage III (2.2 - 0.6 Ga ?)



Stage II (2.7 - 2.2 Ga ?)



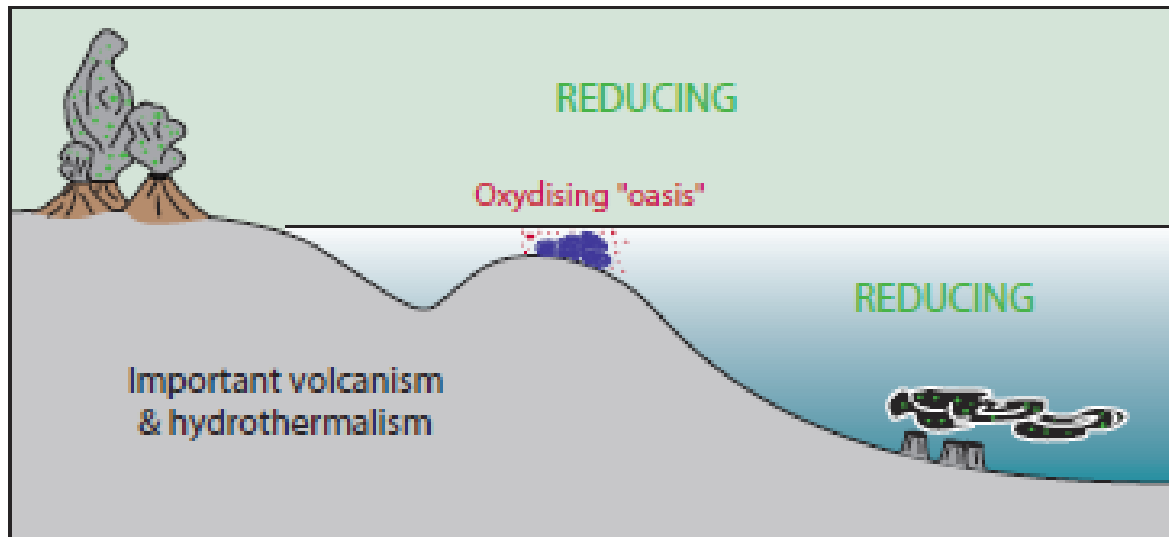
Stage IV (0.6 - 0 Ga ?)



Modèles montrant schématiquement comment les cyanobactéries change le monde
Formation des gisements de fer rubané (ou Banded Iron Formation, BIFs) en -II- et la
ségrégation de l'O₂ dans les océans, puis libération dans l'atmosphère en -III- et -VI-

Oxydation progressive de réservoirs réduits -I-

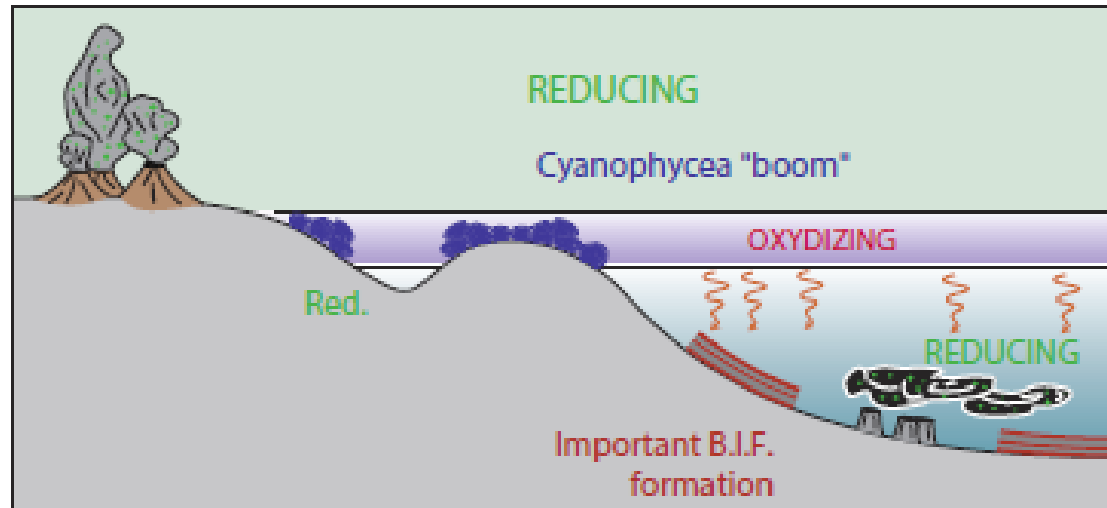
Stage I (4.1 - 2.7 Ga ?)



- Atmosphère et hydrosphère : milieux très réduits
- Libération de l'O₂ dans les « oasis » par cyanobactéries
- Oxydation locale des minéraux/éléments réduits, en particulier le fer (sous forme Fe²⁺ par hydrothermalisme ⇒ Fe³⁺)

Oxydation progressive de réservoirs réduits -II-

Stage II (2.7 - 2.2 Ga ?)



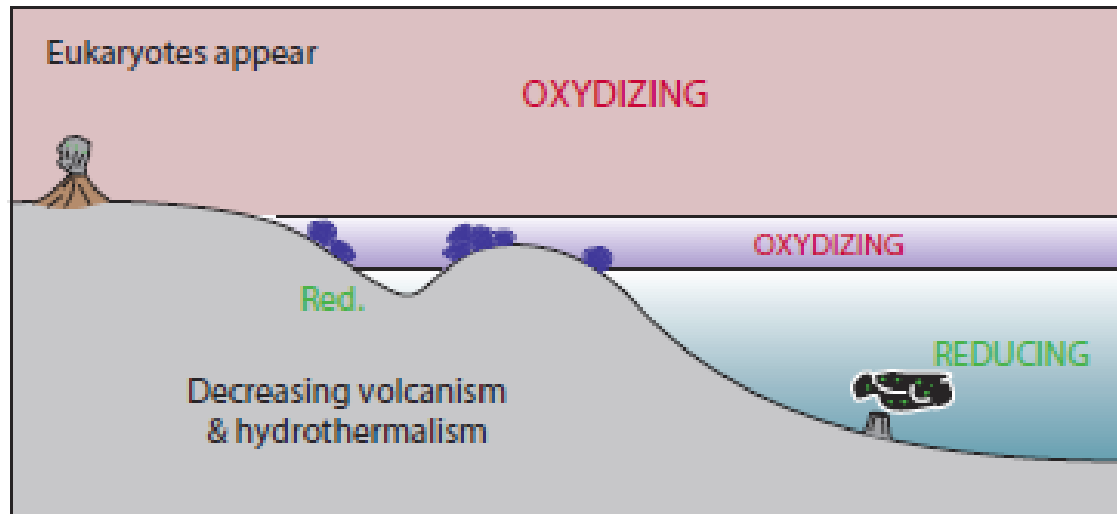
- Atmosphère et hydrosphère : milieux encore très réduits
- La Terre est suffisamment refroidie pour réduire l'activité volcanique et l'hydrothermalisme
- A 2.5-2.3 Ga : pic de BIF (Banded Iron Formations) : oxydation massive du Fe^{2+} en Fe^{3+} par l' O_2 libéré par les cyanobactéries (tant que le fer des océans n'est totalement oxydé) $\Rightarrow$ pas de stockage dans l'atmosphère
- L'océan commence à saturer en O_2 près de la surface (dans les milieux favorables aux cyanobactéries et à la photosynthèse)



Banded Iron Formation (“BIF”) près de Jasper Nob : sédiments chimiques très riches en fer, alternativement oxydé et réduit

Oxydation progressive de réservoirs réduits -III-

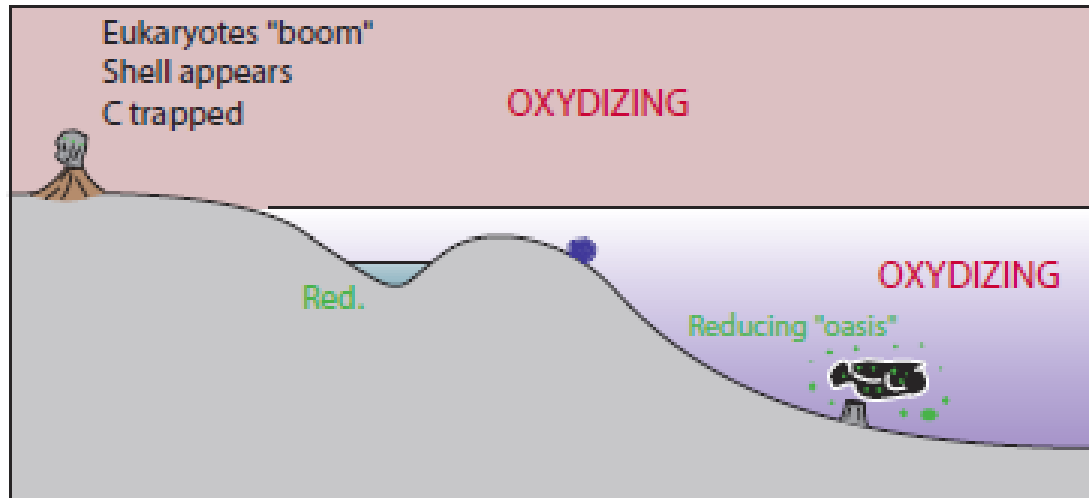
Stage III (2.2 - 0.6 Ga ?)



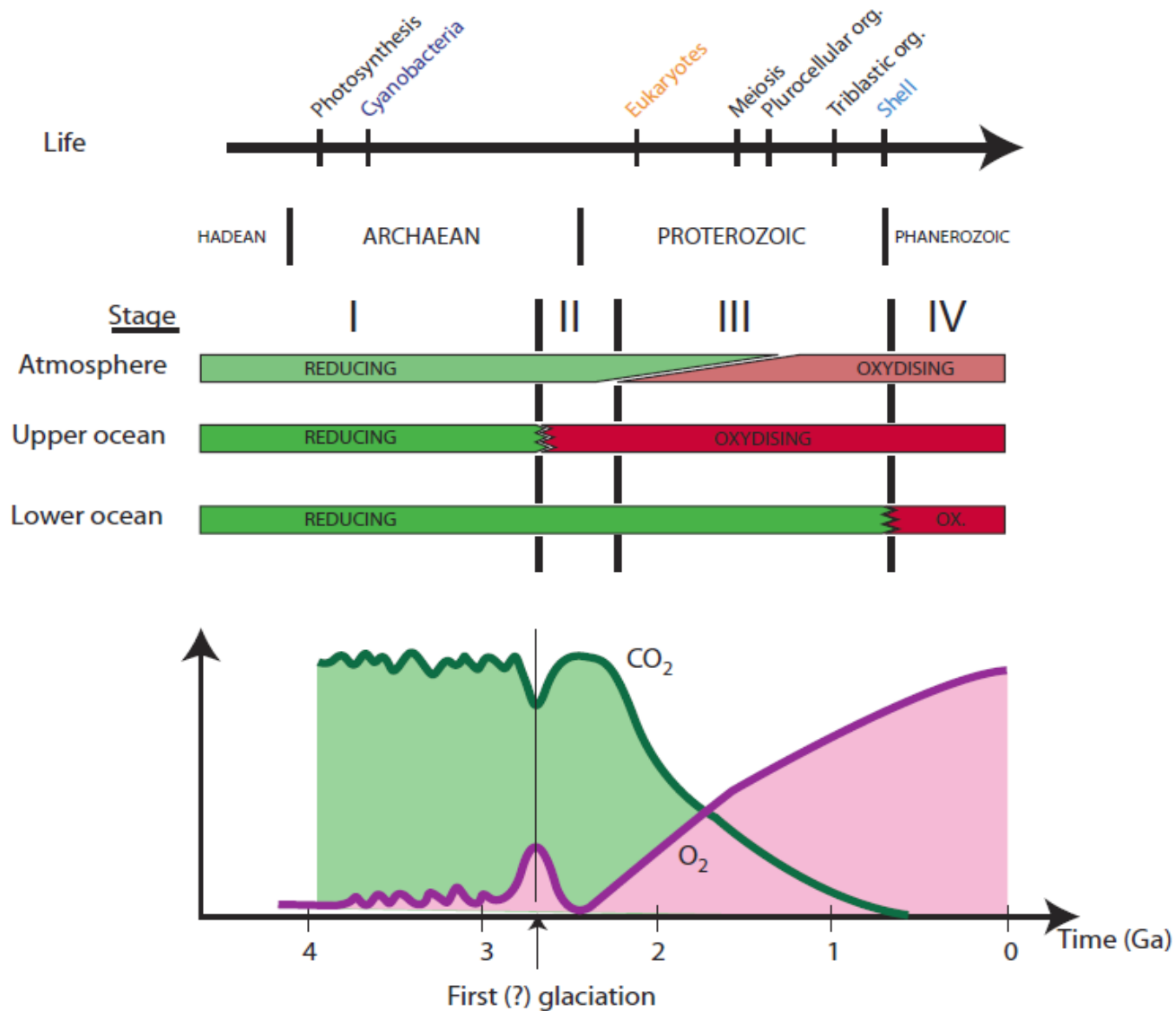
- Atmosphère/Hydrosphère : complètement/partiellement oxydée
- Réduction brutale de l'activité volcanique et l'hydrothermalisme (dès 2.2 Ga)
- Photosynthèse bien plus efficace
- Une fois tout le fer des océans oxydé : l' O_2 libéré par les cyanobactéries passe dans l'atmosphère
- L'océan saturé en O_2 près de la surface
- Apparition des premiers Eukaryotes en surface

Oxydation progressive de réservoirs réduits -IV-

Stage IV (0.6 - 0 Ga ?)



- Atmosphère : complètement oxydée
- Hydrosphère : complètement oxydée
- Intoxication des cyanobactéries : O_2 libéré est un poison
- Persistance « d'oasis réductrices » où peuvent survivre les cyanobactéries (milieux confinés et réducteurs)
- Essor des Eukaryotes en surface !!!



Pendant le Protérozoïque, la quantité d'O₂ libre dans l'atmosphère augmente de 1 à 15%, essentiellement libérée par les cyanobactéries

Oxydation de l'atmosphère : coïncidence ou évolution inévitable ?

■ Coïncidences étonnantes : système très instable ?

1. Baisse régulière de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère (formation des carbonates + photosynthèse) $\Rightarrow$ diminution progressive de l'effet de serre
2. Il ya 2.5-2.3 Ga : bouleversement du style géologique, permettant le piégeage du C et une photosynthèse enfin efficace
3. Augmentation progressive de la luminosité solaire
4. Il ya 2 Ga : **Soleil devient assez chaud** pour maintenir une T° de surface $> 0^\circ$, même avec un effet de serre réduit

Sinon : Chute de T° $\Rightarrow$ Eau gelée $\Rightarrow$ Mort des cyanobactéries $\Rightarrow$ fin de l'histoire ... 😞

Enregistrements de glaciations à 2.4 et 2.1 Ga : basculements ratés vers un système oxydant (O_2), finalement réussi à partir de 2 Ga quand le Soleil a été assez chaud !!

■ Système plus stable qu'on ne le pense : rétro-actions fortes

Si chute de la T° et glaciation $\Rightarrow$ disparition des organismes photosynthétiques et arrêt de la précipitation des carbonates $\Rightarrow$ Destruction du CO_2 enrayée $\Rightarrow$ effet de serre
Emission continue de CO_2 par les volcans et CH_4 par bactéries chimiosynthétiques méthanogènes « protégées » $\Rightarrow$ effet de serre renforcé $\Rightarrow$ T° augmente $\Rightarrow$ reprise des cyanobactéries 😊