



QUELQUES ASPECTS DE L'EVOLUTION DES ENVELOPPES ET DES CLIMATS DE LA TERRE

Carbonates, silicates, CO₂: quelques
exemples d'interactions entre
différents réservoirs de C

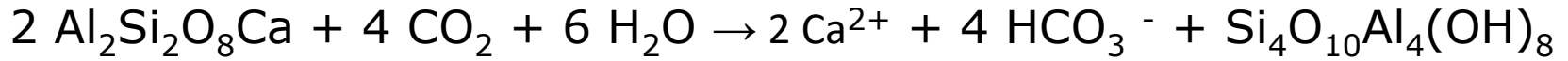


Granite rose de Ploumanach (Bretagne)

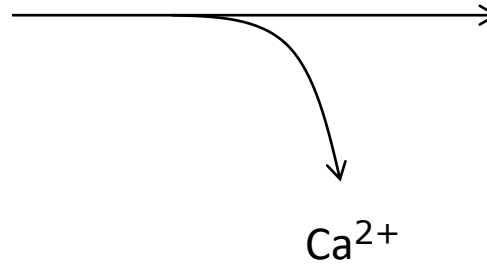
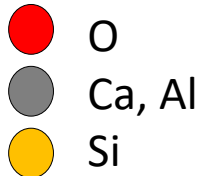
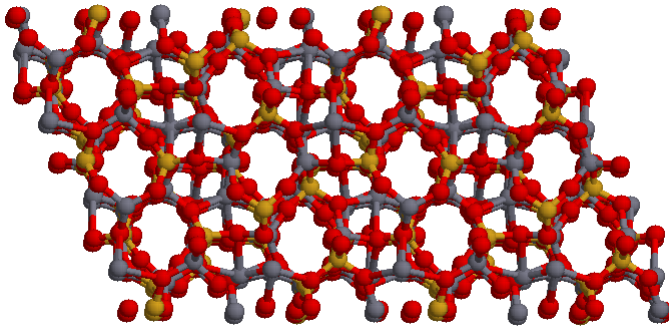


Canyon du Toulourenc, Vaucluse

Altération du feldspath plagioclase (silicate le plus fréquent de la croûte):

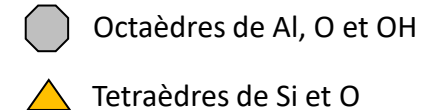
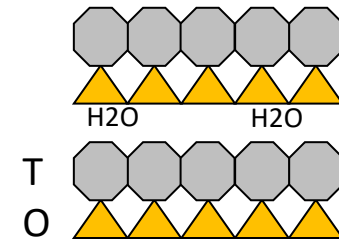


Feldspath



Départ de Ca^{2+}

Kaolinite (argile)

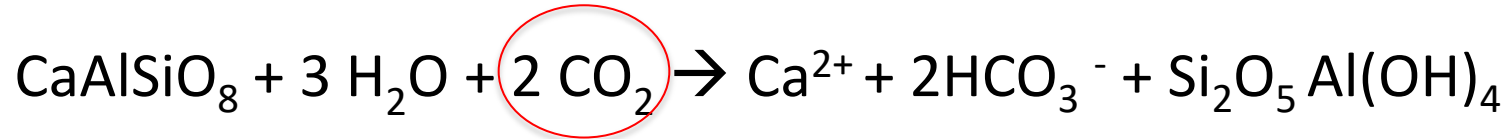


Réorganisation de Si, O et Al

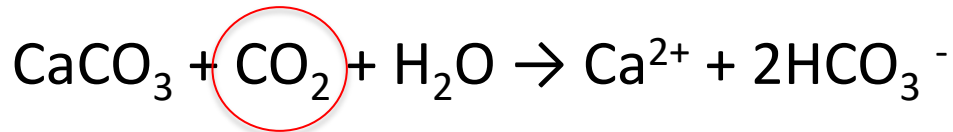
Altération d'un pyroxène calcique:



Altération d'un pyroxène calcique:



Dissolution du calcaire:



Il faut "consommer" 2 CO₂ atmosphériques pour mettre en solution 1 Ca²⁺, alors que la dissolution des calcaires ne consomme qu'un seul CO₂ atmosphérique.



Barrière récifale, Bora Bora, Polynésie



Fontaine pétrifiante de Réotier, Hautes Alpes

Altération d'un pyroxène calcique:



Précipitation du calcaire:

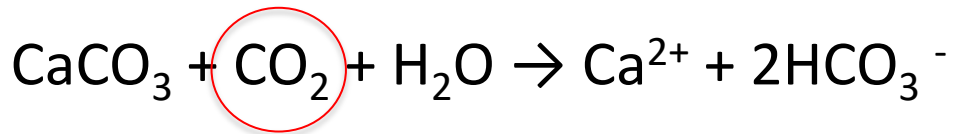


Expérience

L'altération du pyroxène consomme 2 CO₂ pour 2 HCO₃⁻ et 1 Ca²⁺.
La précipitation d'autant de Ca²⁺ et HCO₃⁻ ne libère qu'1 CO₂.

L'ensemble de ces processus pompe donc 1 CO₂ dans l'atmosphère pour le fixer en CaCO₃

Précipitation - dissolution du calcaire:



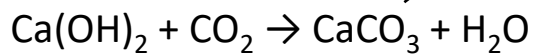
Objectif: Montrer que ce les eaux acides, chargées en CO₂, qui solubilisent préférentiellement les carbonates

Eau de chaux
(10 ml)



+ CO₂

Eau de chaux
(10 ml)



Particules en
suspension

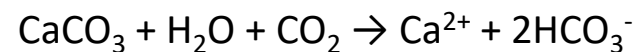
+ 5 ml eau
distillée

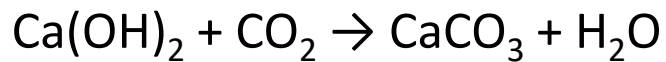
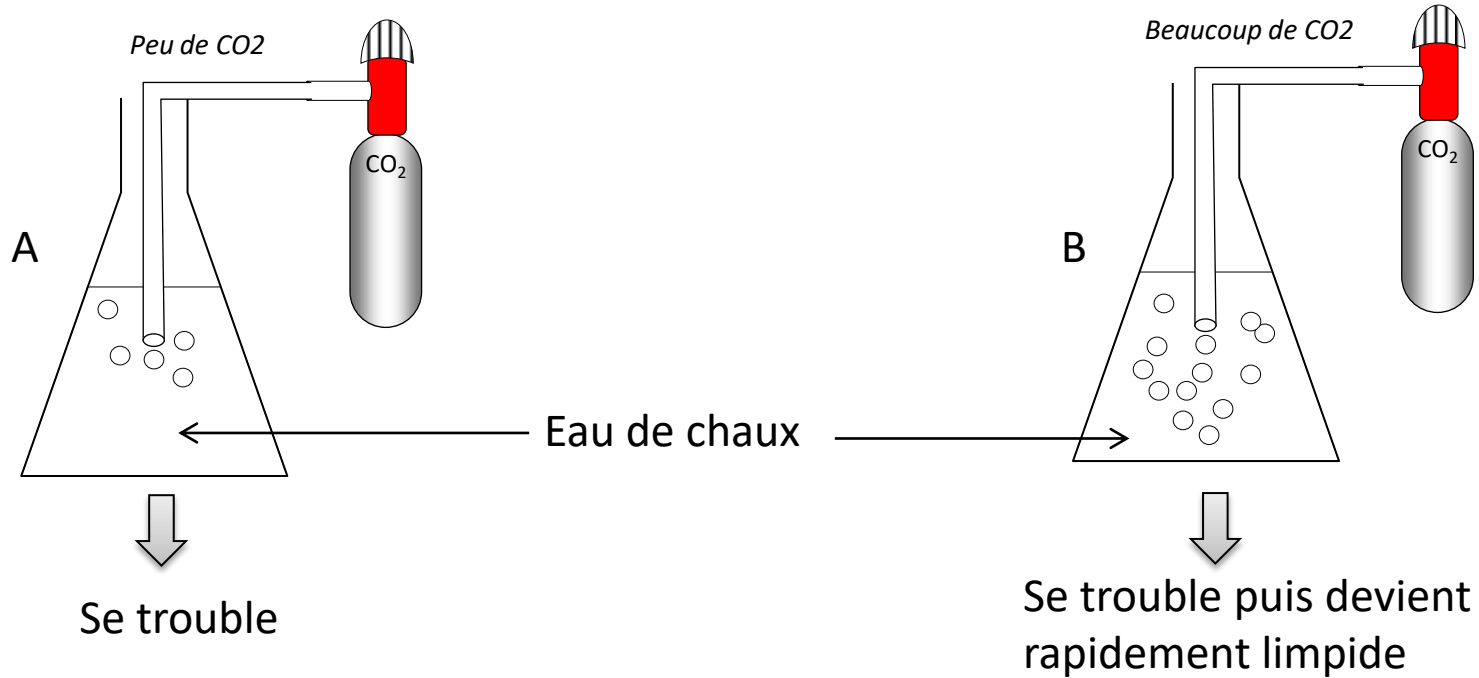


+ 5 ml eau
gazeuse
(Perrier)

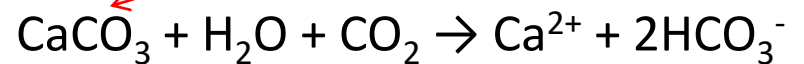
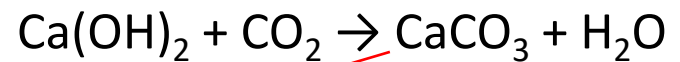


Dissolution facilitée
des particules de
CaCO₃





ou bien sous forme ionique:



Objectif: Montrer que l'activité photosynthétique favorise la précipitation des carbonates

Tufs calcaires (travertins)



← Débris de végétaux enrobés
de CaCO₃



Consommé par la photosynthèse donc
équilibre déplacé

Objectif: Montrer que l'activité photosynthétique favorise la précipitation des carbonates

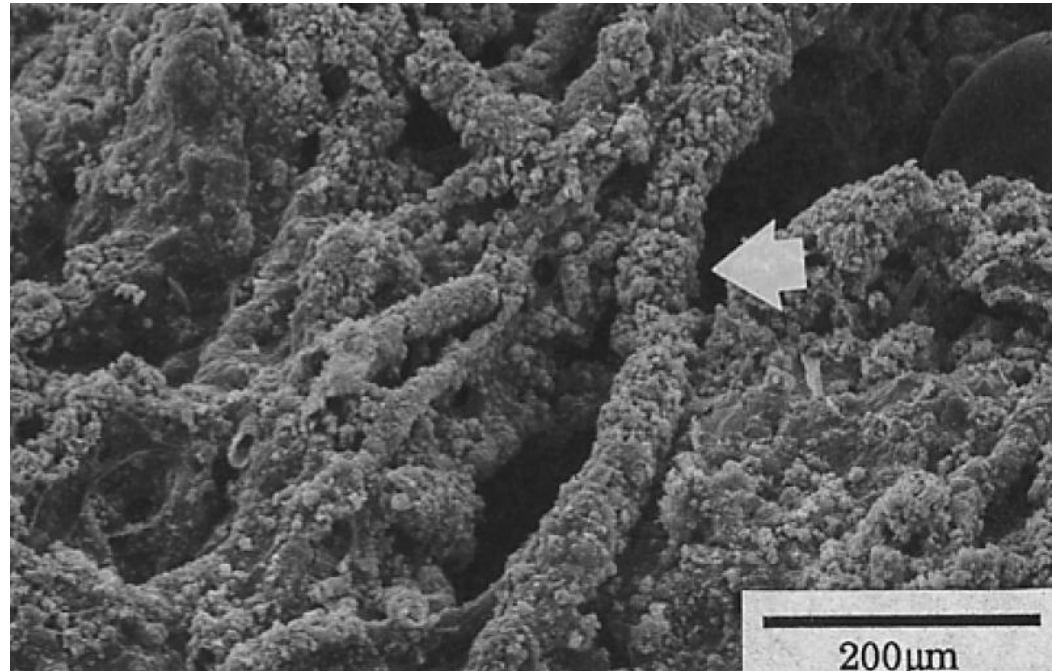
Stromatolites

Stromatolite fossile (Protérozoïque)

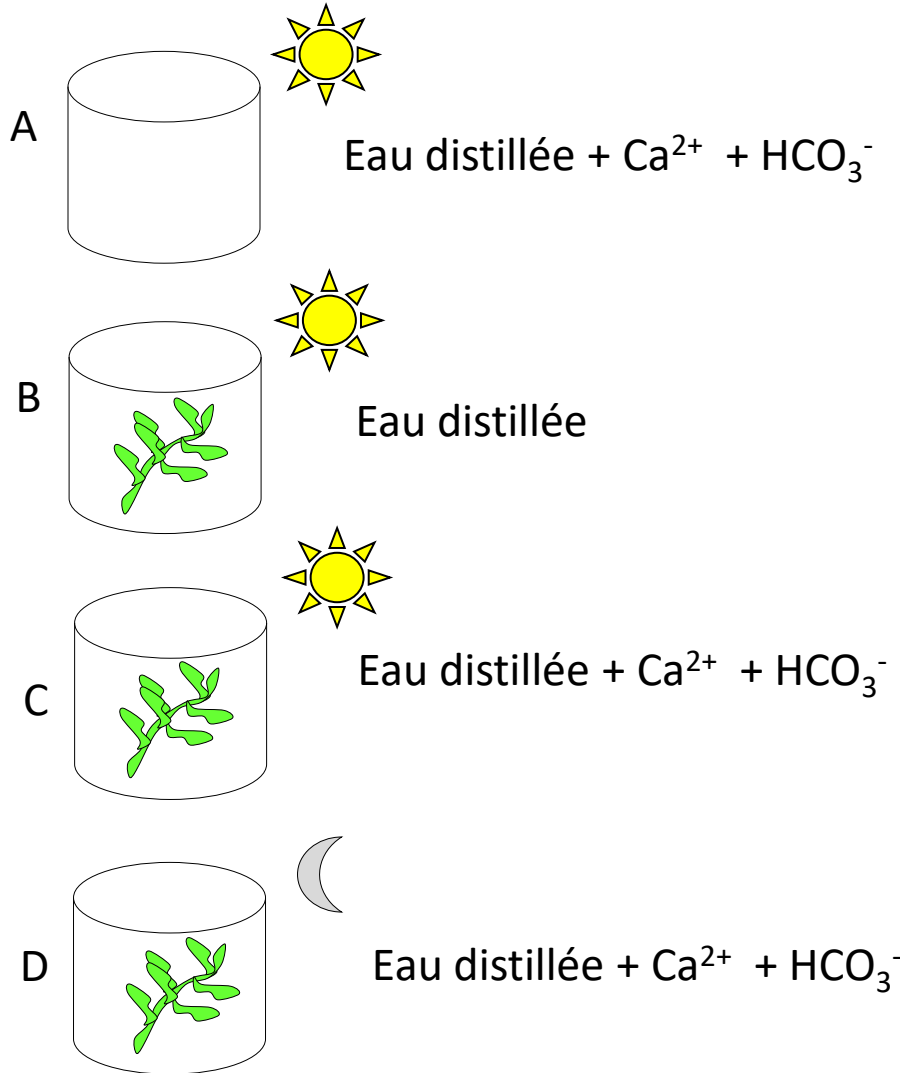


Cliché au MEB montrant la précipitation des carbonates autour des filaments cyanobactériens.

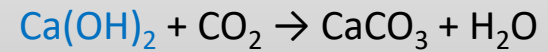
(D'après Chafetz et Buczynski, 1992).



Objectif: Montrer que l'activité photosynthétique favorise la précipitation des carbonates



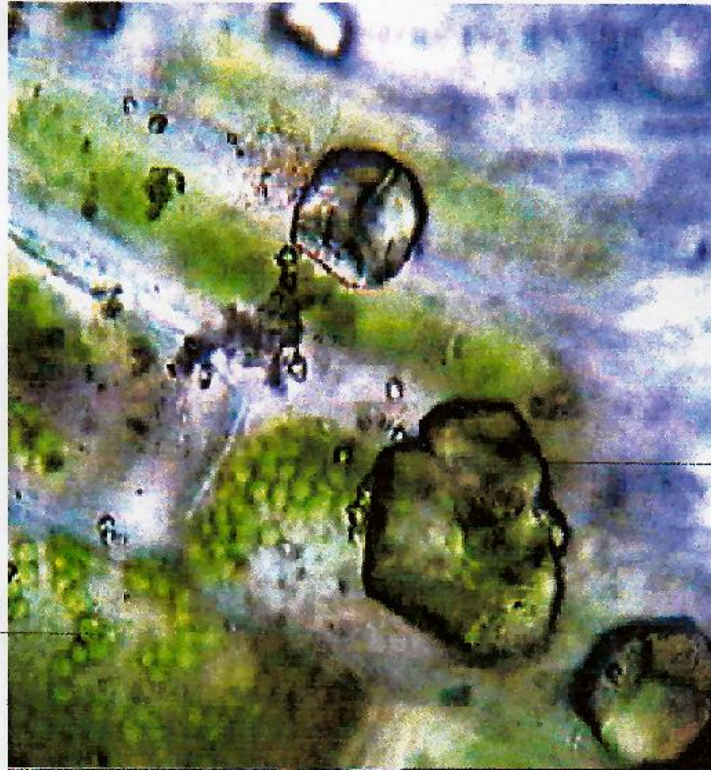
Pour enrichir en Ca²⁺ et HCO₃⁻, on peut ajouter (pour 200 ml) 5 ml **d'eau de chaux** + 5 ml **d'eau gazeuse (Perrier)**:



C

**Précipitation de CaCO₃
à la surface d'un fragment
de feuille d'Elodée**

Cellule chlorophyllienne
contenant des chloroplastes



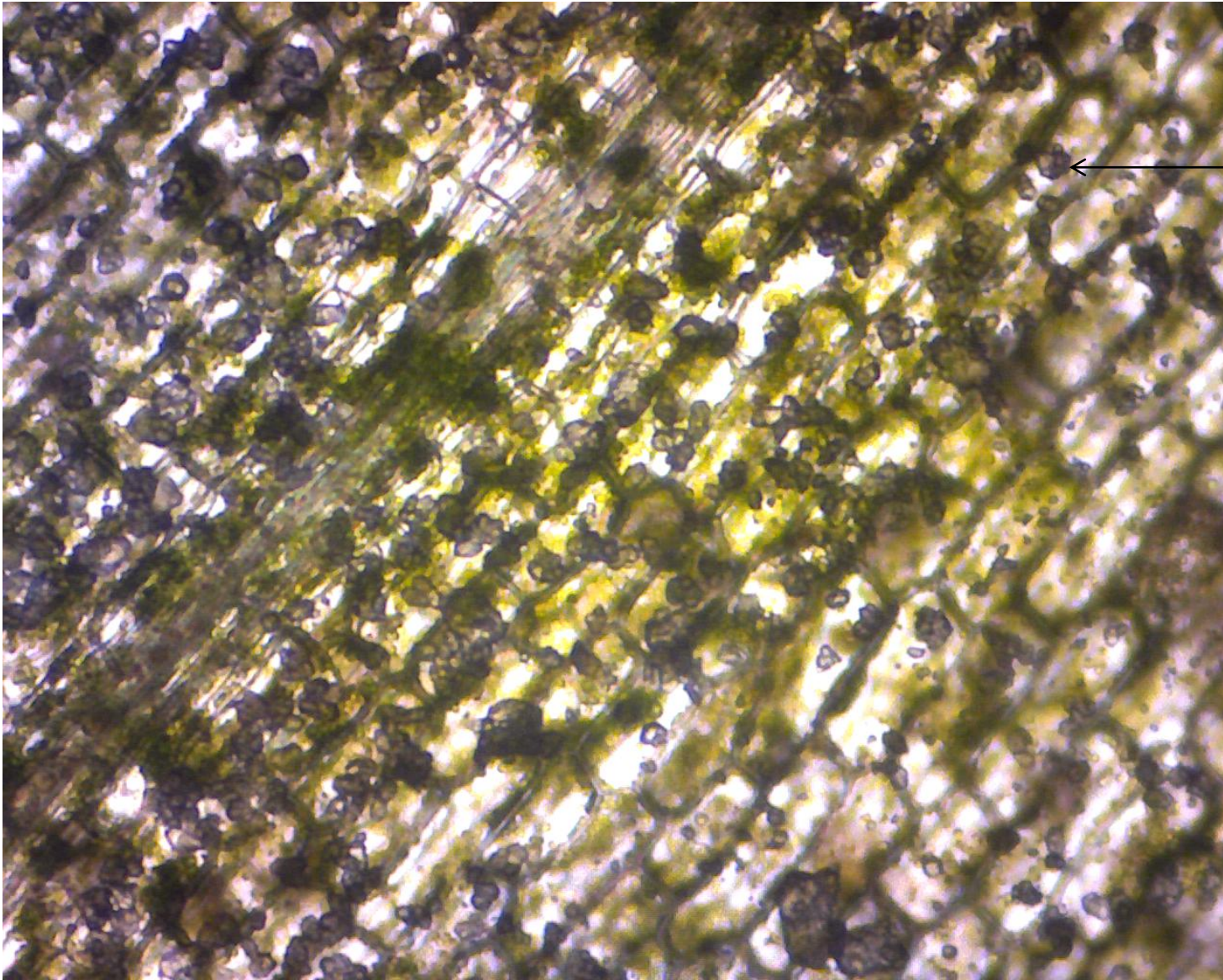
CaCO₃
Cristallisé

* 600



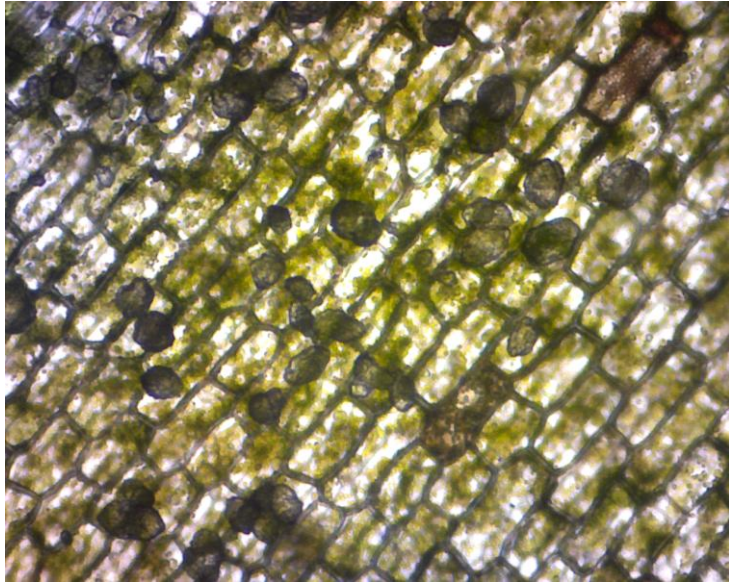
Consommé par la photosynthèse donc
équilibre déplacé

Elodée + eau de chaux + CO₂ + lumière

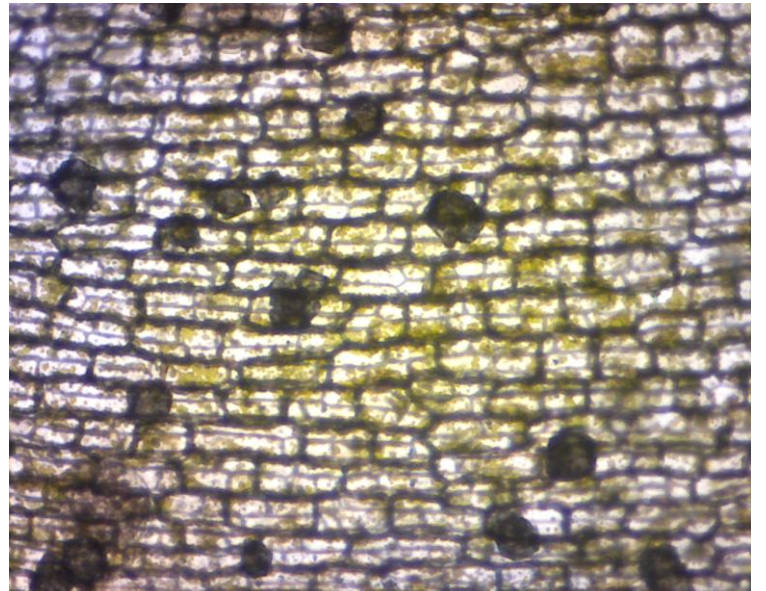
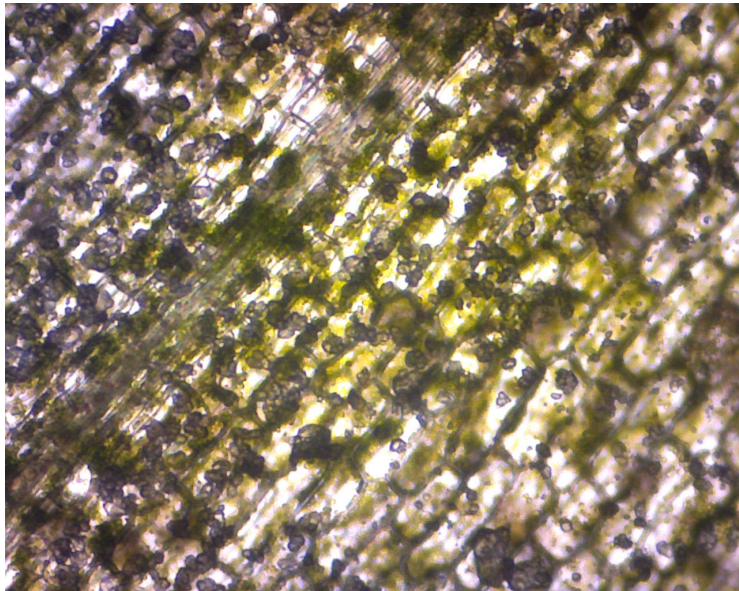
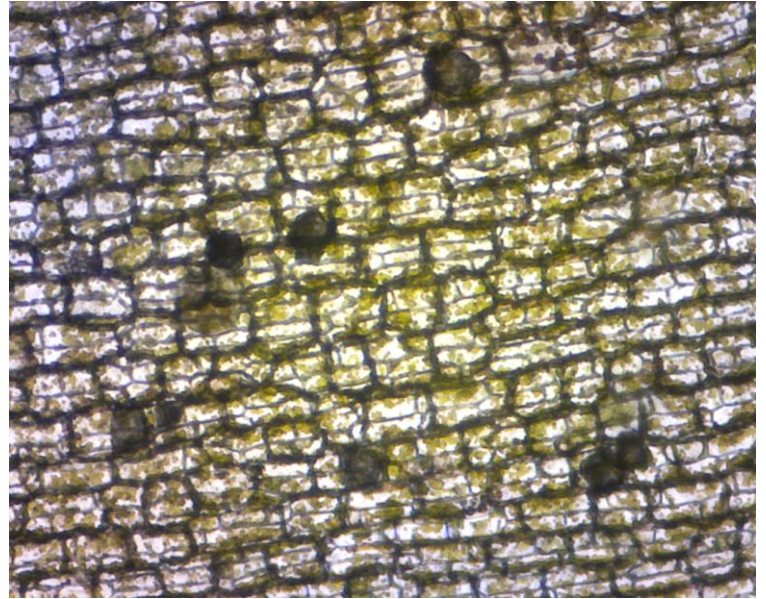


← Cristaux de
CaCO₃

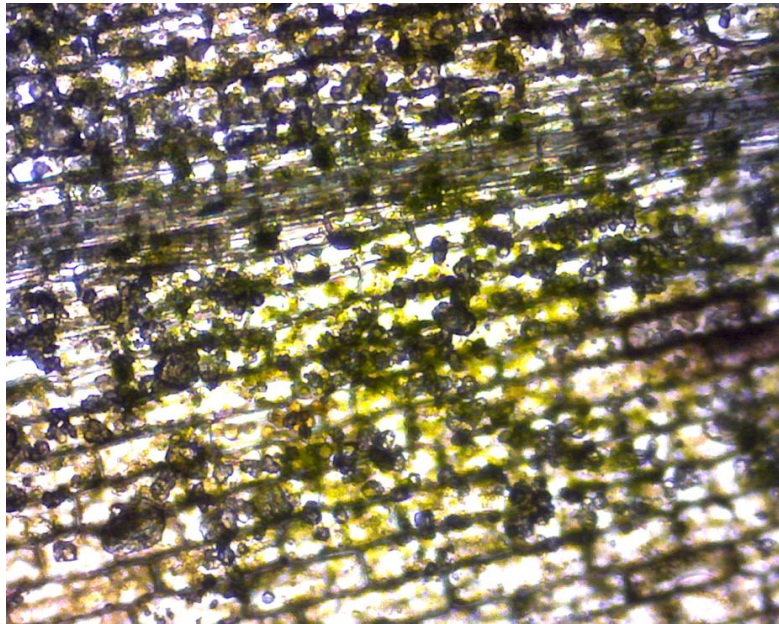
Elodée + eau de chaux + CO₂ + lumière



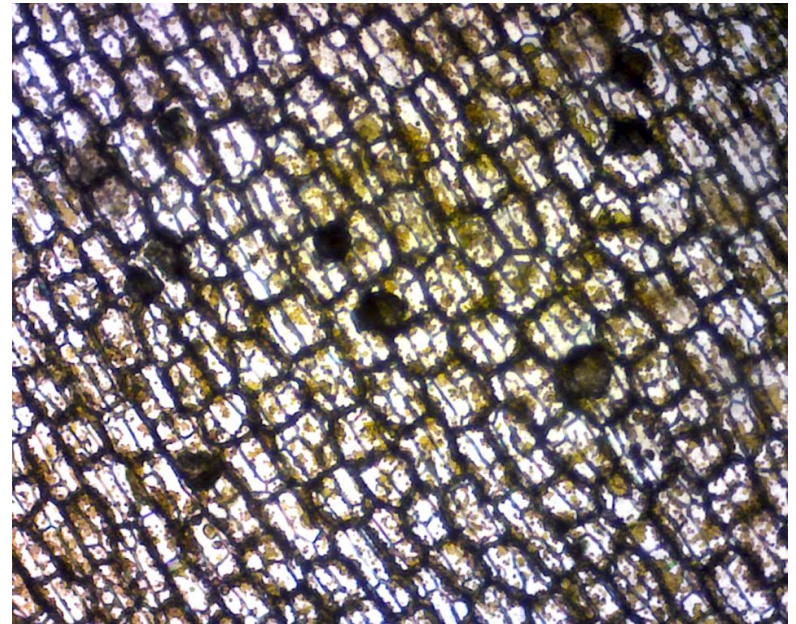
Elodée + eau de chaux + CO₂ + obscurité



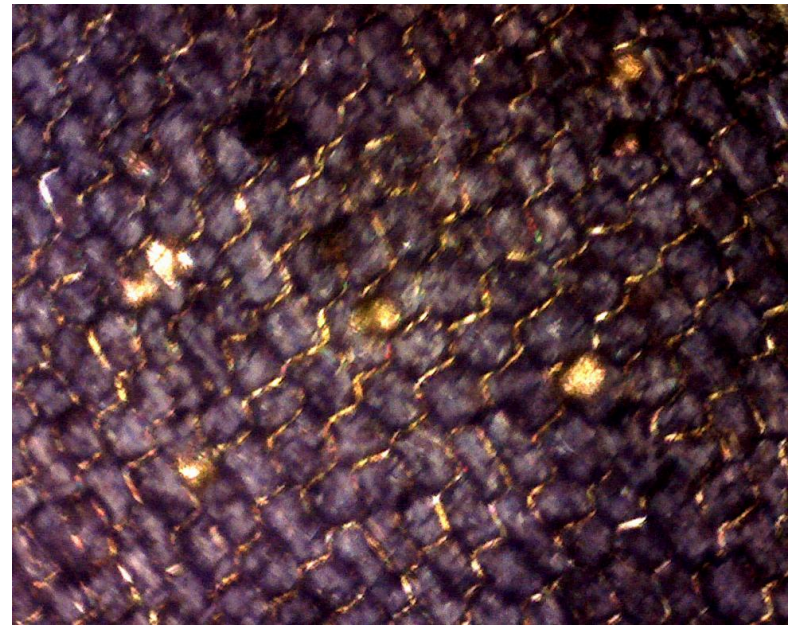
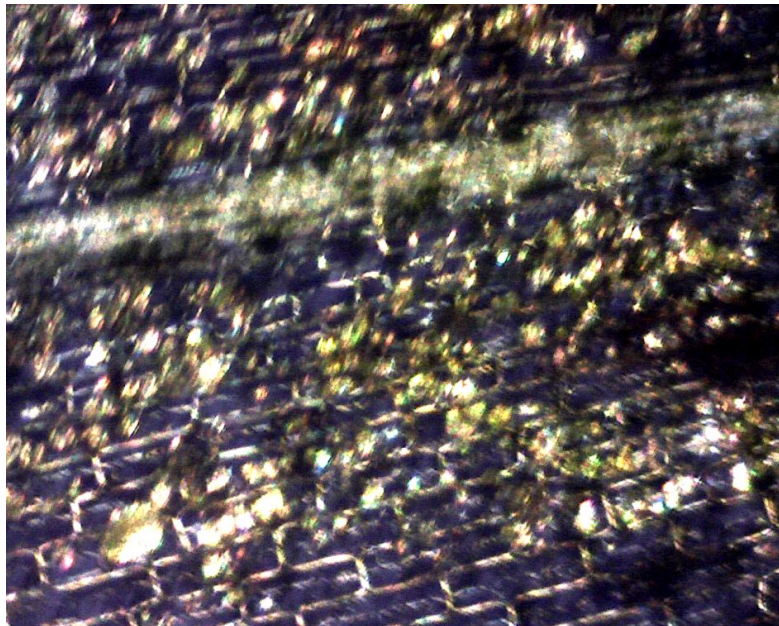
Elodée + eau de chaux + CO₂ + lumière



Elodée + eau de chaux + CO₂ + obscurité



LPNA



LPA

Silicates, carbonates et CO₂

Expériences et observations

Avec des cyanobactéries (Nostoc)



x600

Avec des cyanobactéries (Nostoc)

Matériel :

3 jours avant l'observation, on réalise les montages suivants :

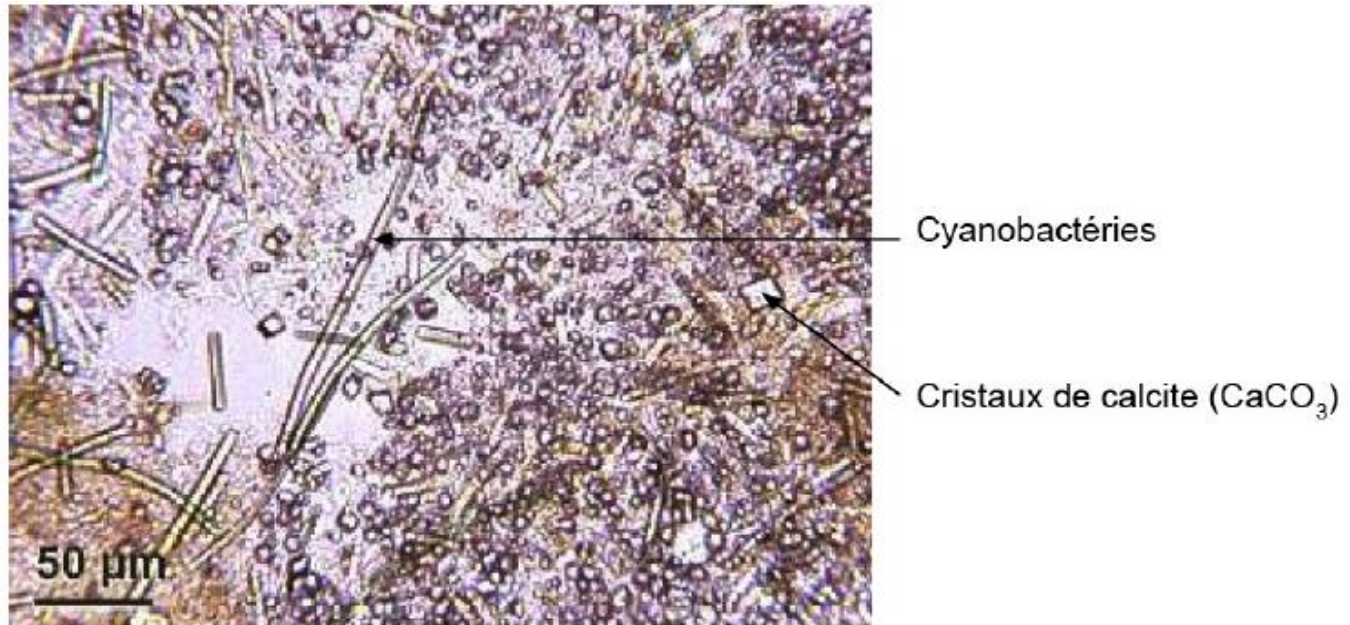
Montage 1 : Cyanobactéries (Nostoc) + hydrogénocarbonate de calcium à la lumière

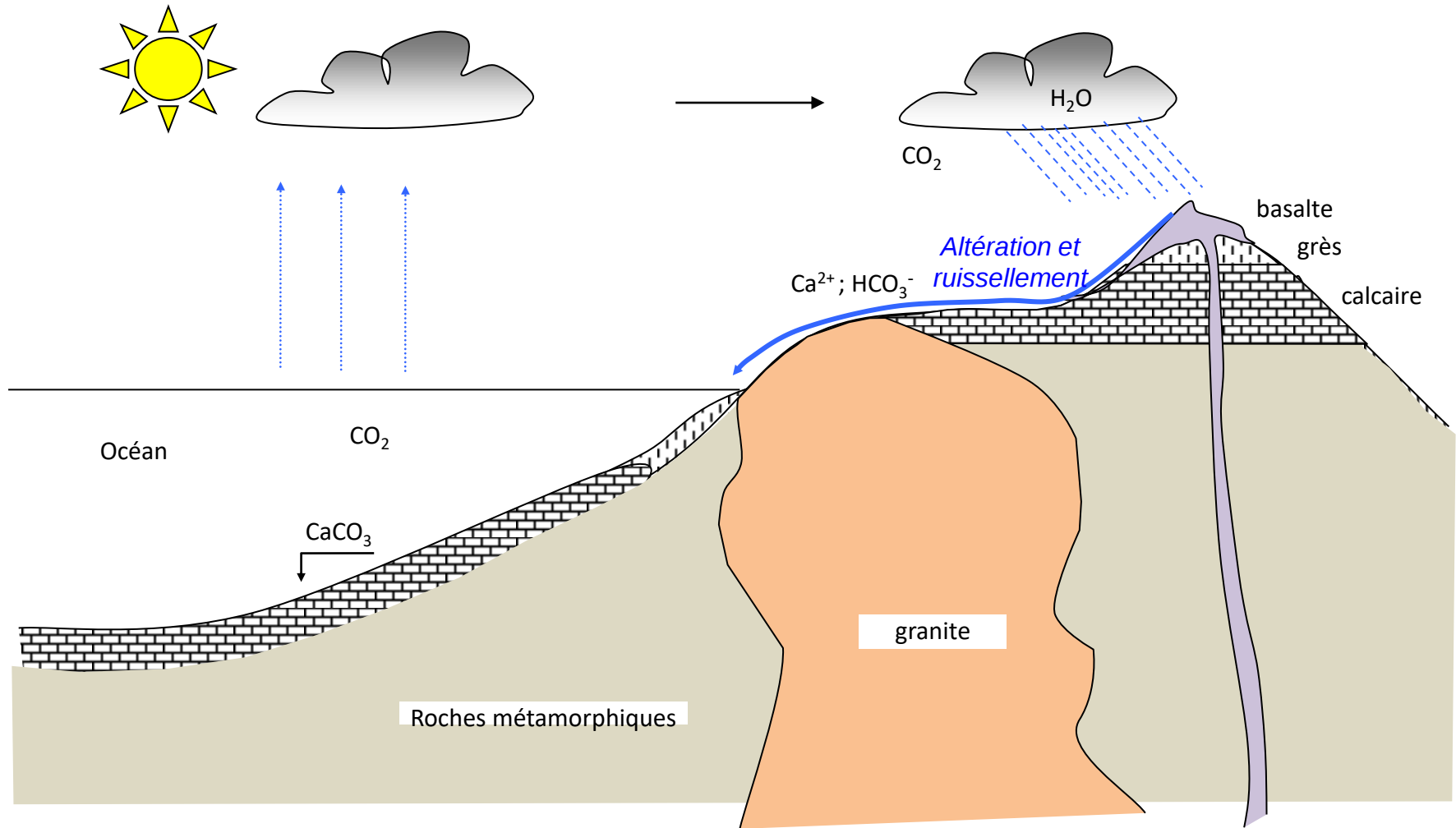
Montage 2 : Cyanobactéries (Nostoc) + hydrogénocarbonate de calcium à l'obscurité

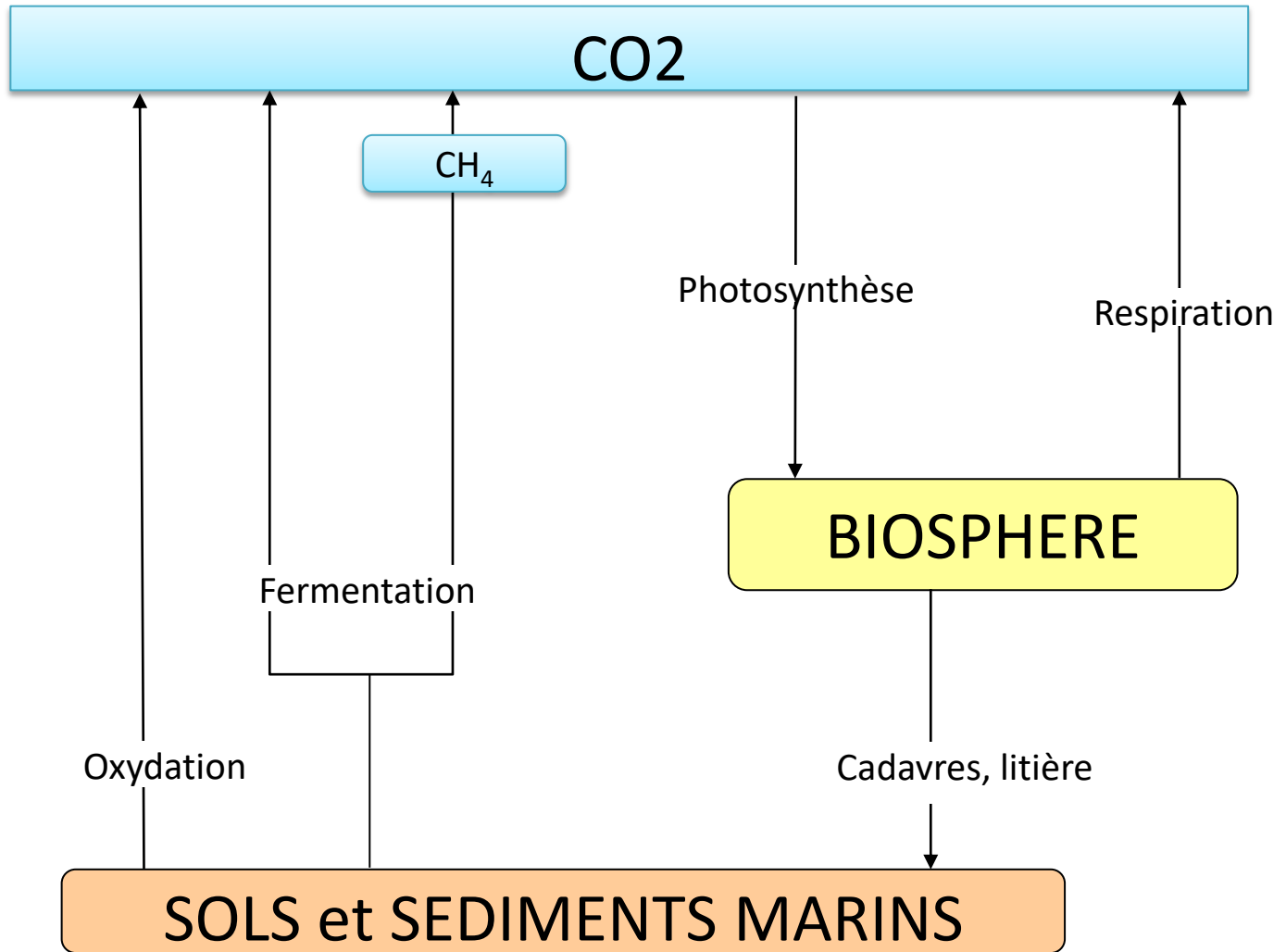
Activité: Réaliser une préparation microscopique de chaque montage et rechercher des cyanobactéries.

- sur une lame sèche, **déposer un fragment de quelques millimètres de Nostoc d'un montage**
- avec la lame de rasoir, **hacher le fragment**
- **recouvrir d'une goutte du liquide de montage**
- **placer une lamelle puis observer**

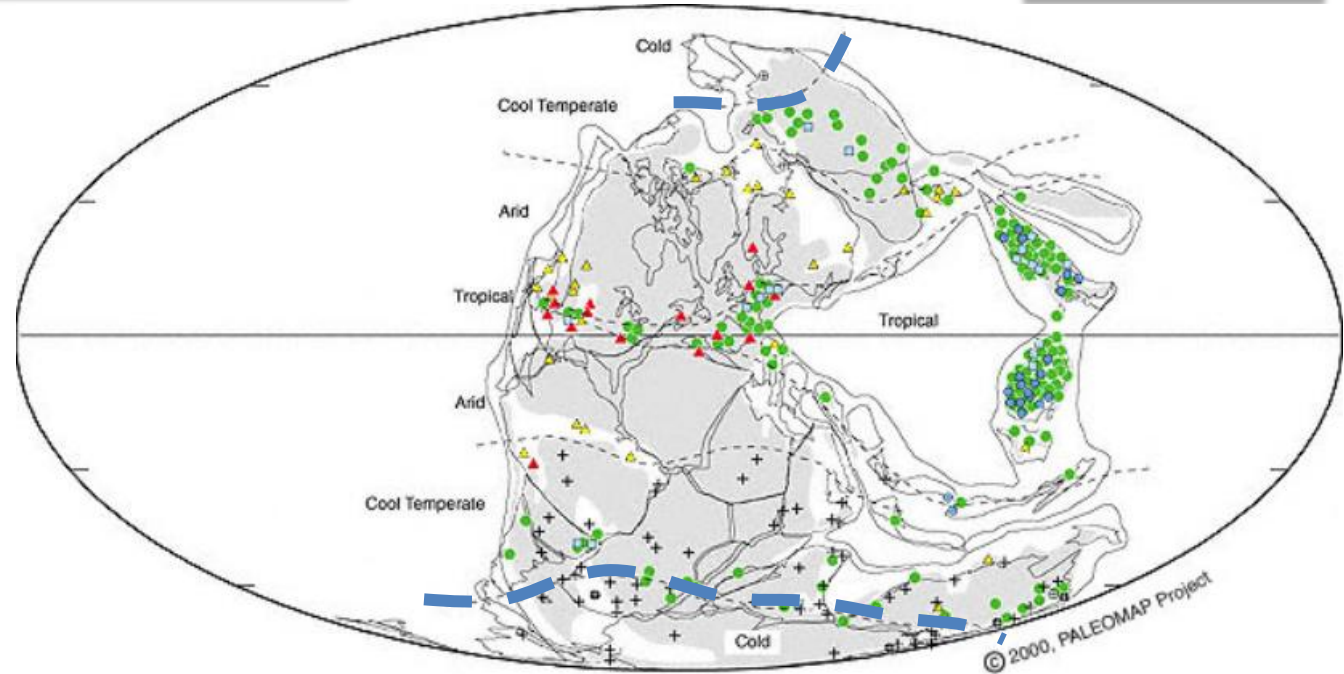
Montage 1





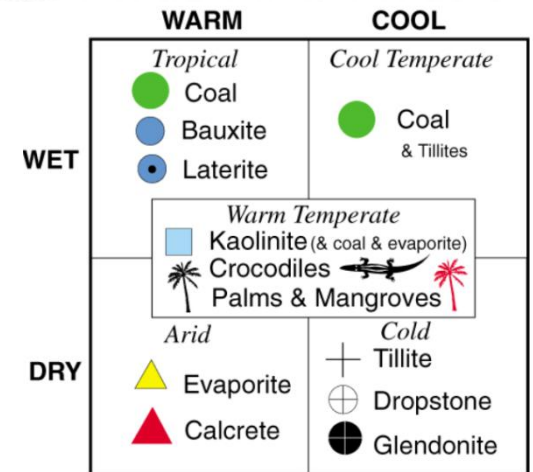
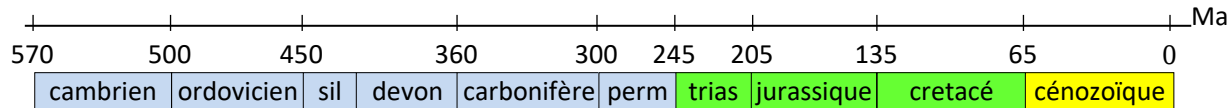


Un exemple d'évolution climatique: Du Silurien au Permo-Carbonifère

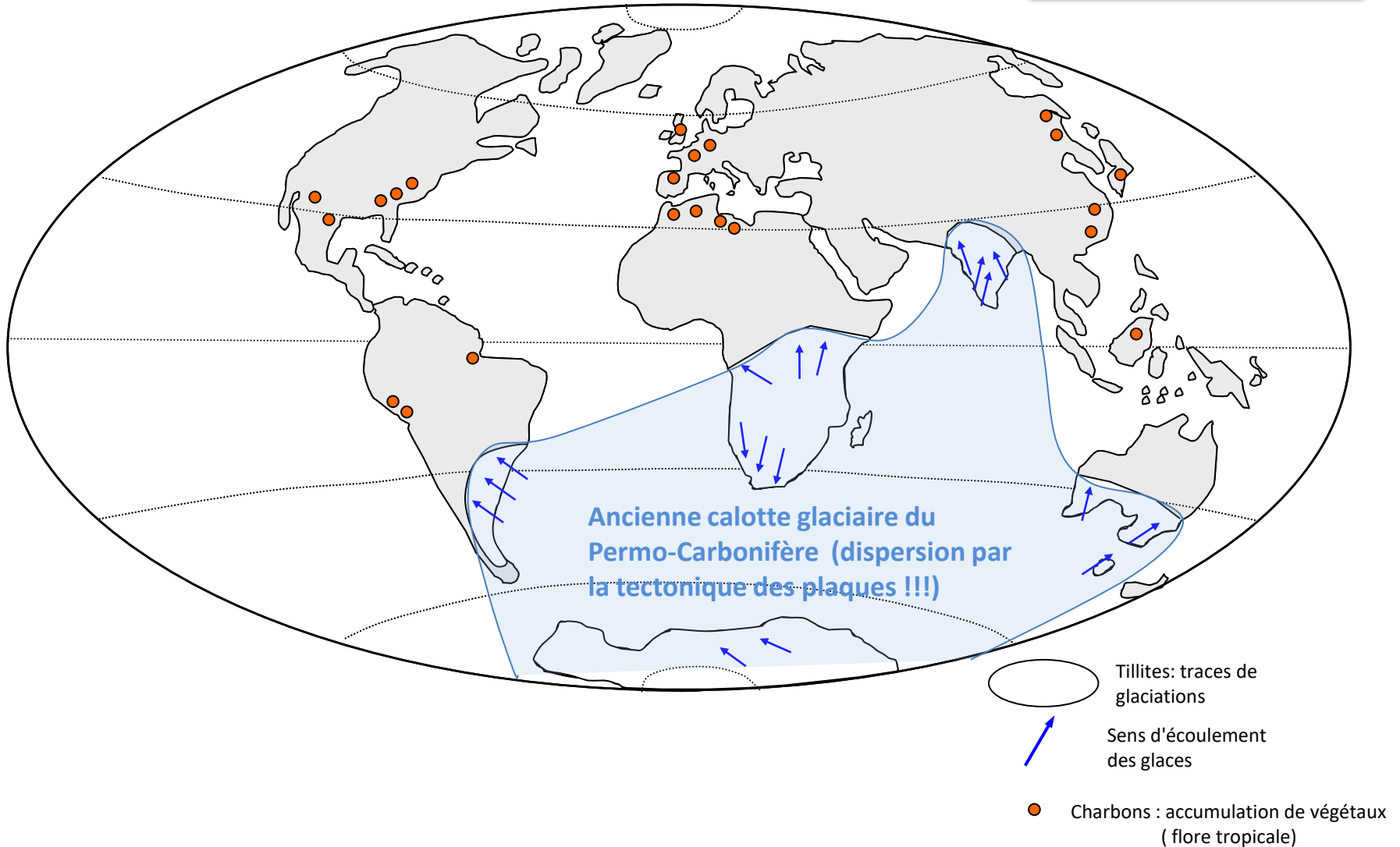


Lower Permian

Tilites (moraines) → Refroidissement



"Paratropical" = High Latitude Bauxites



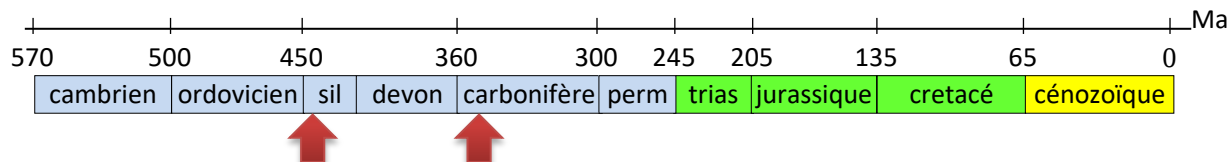
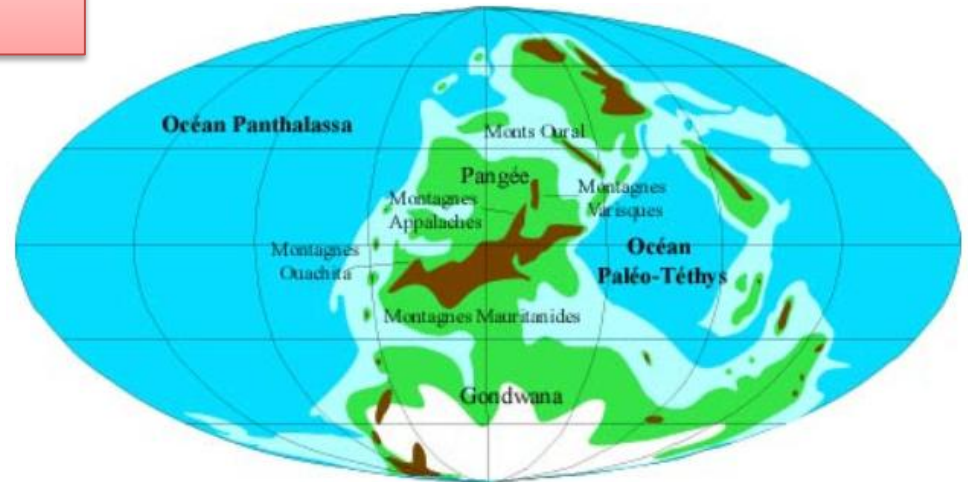
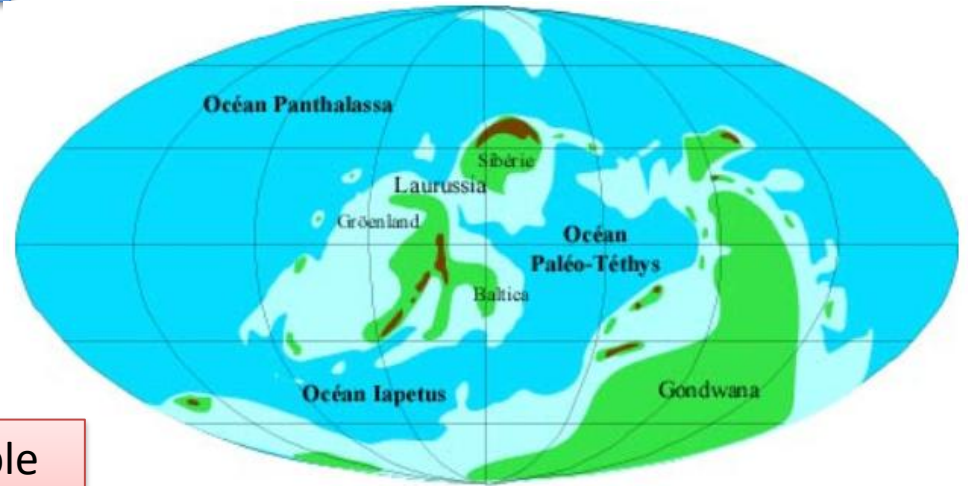
SILURIEN INF

Reliefs en marron

Le développement des reliefs est favorable à une augmentation des processus d'érosion

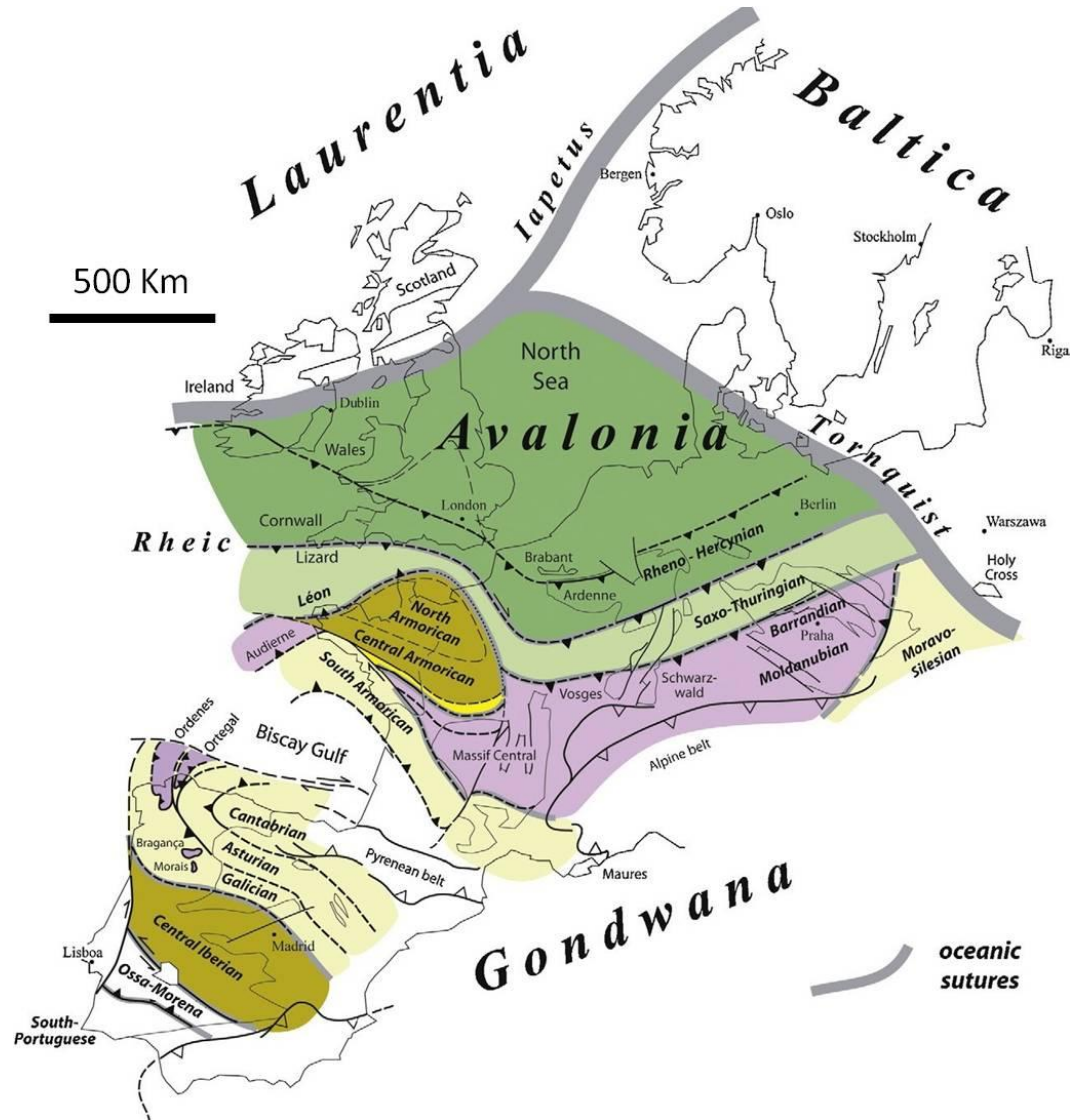
CARBONIFERE INF

La collision entre la Laurasia et le Gondwana engendre la chaîne Hercynienne.



Voir activité: Chaîne hercynienne

Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.



Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

QUELQUES DONNEES:

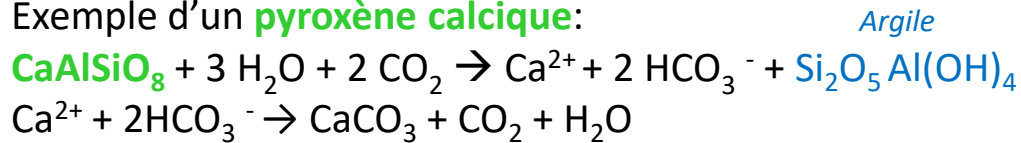
Quantité (estimation) de silicates calciques dans la croûte continentale : 2%

Densité moyenne des roches : 3000 Kg/m³

Quantité de CO₂ atmosphérique actuelle (estimation) : 750 GT de C soit 2750 GT de CO₂

La masse de CO₂ consommé correspond à 78 % de la masse des silicates calciques altérés (calcul d'après équation ci dessous).

Exemple d'un **pyroxène calcique**:



Rappel: l'altération d'1 pyroxène calcique consomme 1 CO₂

Les fleuves ne charrient pas à la mer que de l'argile (résultat de l'altération des silicates) mais aussi des galets et du sable qui contiennent des silicates calciques non altérés. On peut raisonnablement penser que seul 10 % des silicates sont altérés.

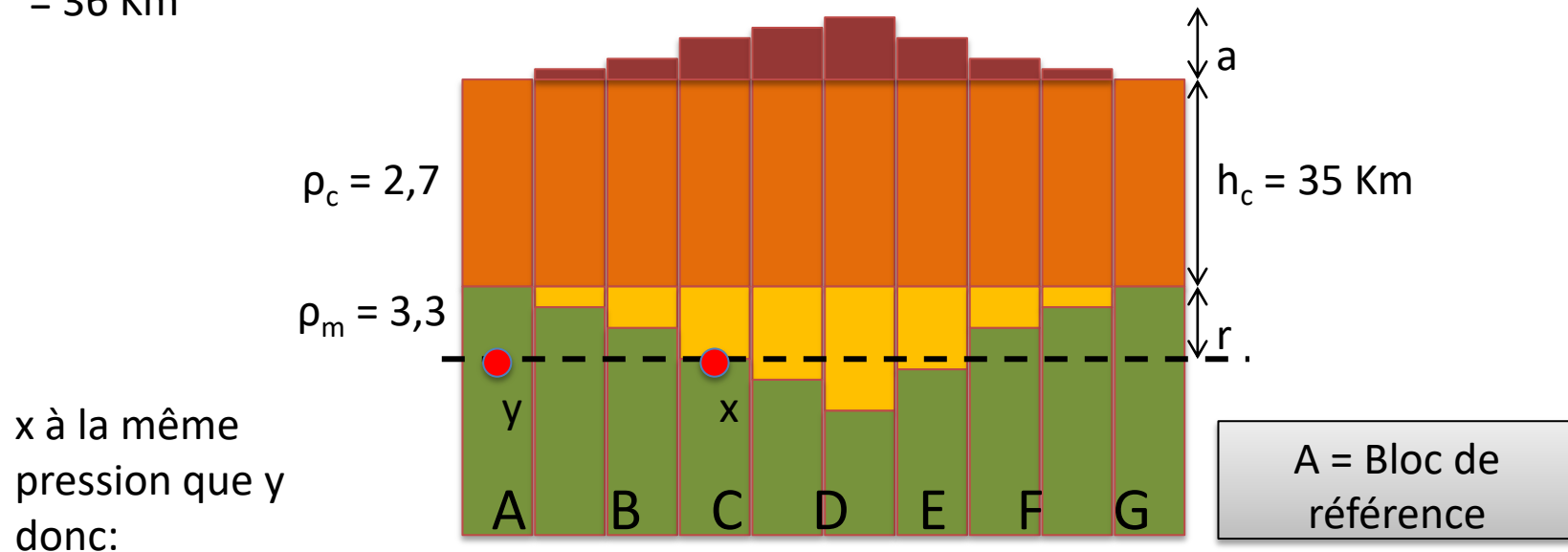
Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Estimation de l'épaisseur de croûte continentale érodée a la fin du Carbonifère (estimation) :

On pense que l'altitude de la chaîne hercynienne dépassait celle de l'Himalaya actuel.

→ On prend donc une altitude minimum de 8 km.

Selon le principe d'isostasie, à un relief de 8 km correspond une racine crustale de $8 \times 4,5 = 36$ Km



x à la même
pression que y
donc:

$$\rho_c \cdot (a + h_c + r) = (\rho_c \cdot h_c) + (\rho_m \cdot r)$$

$$2,7 \cdot (a + 35 + r) = (2,7 \cdot 35) + (3,3 \cdot r) \text{ donc } 2,7 (r + a) = 3,3 r \text{ donc}$$

$$2,7 a = (3,3 - 2,7) r$$

$$\text{Donc } r = 2,7 a / 0,6 \text{ c'est-à-dire } r = 4,5 \times a$$

Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Estimation de l'épaisseur de croûte continentale érodée a la fin du Carbonifère (estimation) :

Donc si on enlève une épaisseur de 8 Km de croute en surface, il y a aussi $4,5 \times 8 = 36$ Km de racine qui disparaît.

L'érosion complète de ce massif correspond donc en réalité à 8 km (en altitude) + 36 Km de racine crustale qui disparaît, soit 44 Km.

Remarque: Dans cette estimation, on considère que toute la chaîne est à une altitude de 8 km. Ce qui est faux ! Par conséquent, l'épaisseur de matériel crustal réellement érodé est bien inférieure.

Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Estimation de l'épaisseur de croûte continentale érodée a la fin du Carbonifère (estimation) :

On peut aussi s'appuyer sur des observations de terrain (plus rigoureux)

Exemple: Dans les bassins limniques du Stéphaniens (fin Carbonifère), on trouve des sédiments discordants sur un substratum métamorphisé dont le degré de métamorphisme correspondant à une profondeur de 25 Km. Cela signifie que localement, 25 Km de croûte continentale a pu disparaître par érosion.

Exemple de discordance hercynienne:
Carrière de Loiras, Herault



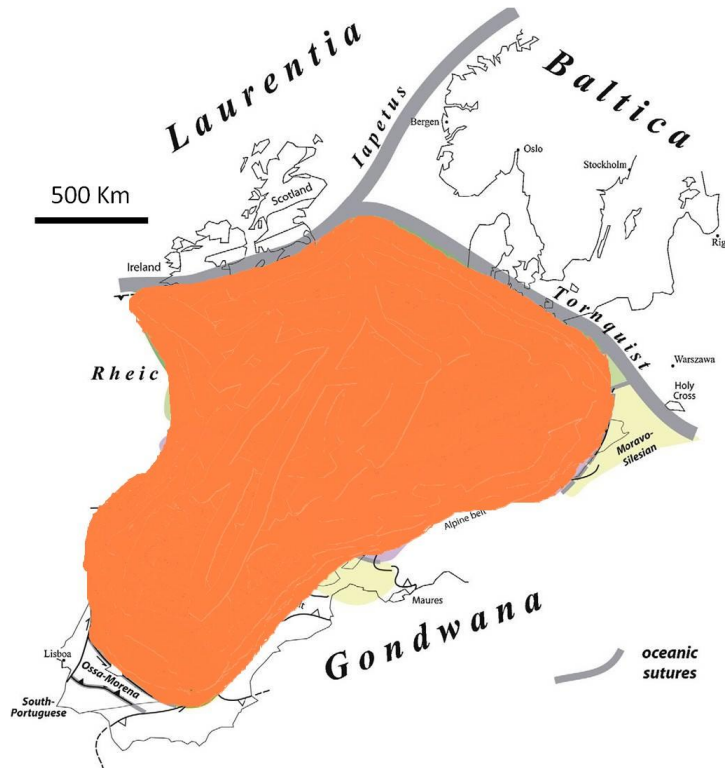
Permien basal du bassin de Lodève = pélites gréseuses

Cambrien dolomitique

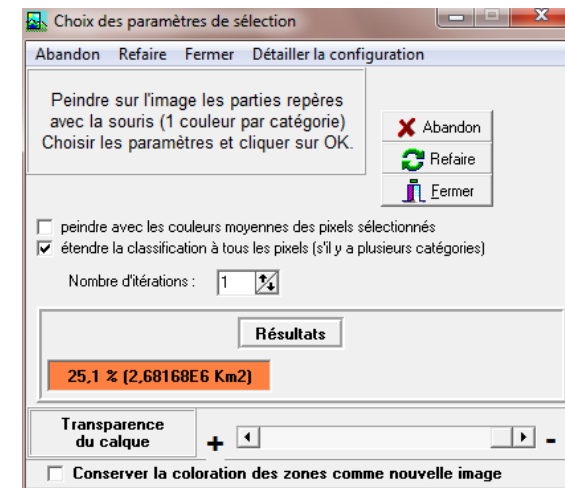
Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Pour notre calcul, on prendra une épaisseur de croûte érodée de 30 Km

Estimation de la surface de la chaîne hercynienne avec Mesurim:



1. Définir échelle
2. Colorier la surface correspondant à la chaîne
3. Délimiter des zones



→ Surface = 2 680 000 Km²

Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Les données (à fournir par l'expérimentateur)

Surface totale du massif montagneux	2 680 000	en km ²	Entrez la valeur de la surface
Epaisseur de croûte disparue	30	en Km	Entrez l'épaisseur de croûte érodée
Densité moyenne des roches	3000	en kg/m ³	
Quantité de silicates calciques	2	en % de la croûte continentale	

Les résultats

Hauteur disparue	30	en km
Volume de roche disparu	80400000	en km ³
Masse des roches disparues	2,412E+20	en kg
Masse de silicates calciques altérés	4,824E+18	en kg
Quantité de CO ₂ consommé	3,76272E+18	en kg

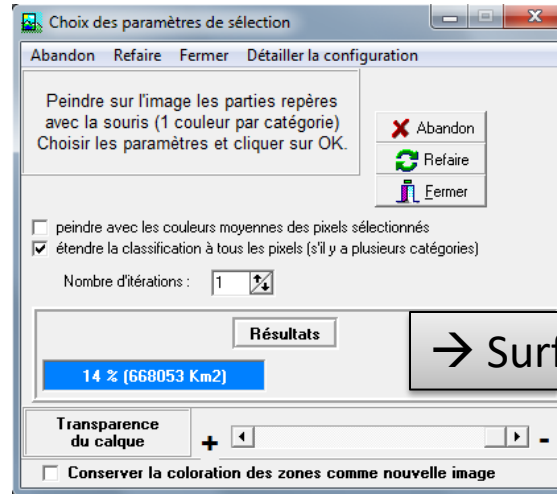
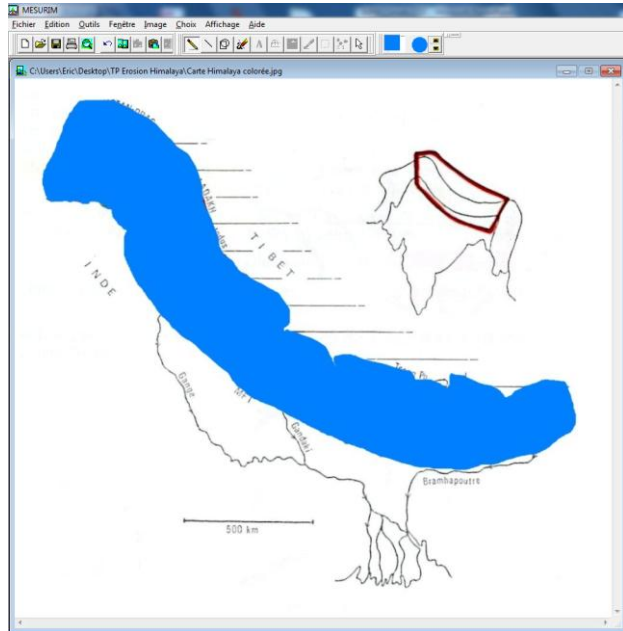
Cette quantité de CO₂ correspond a **1368** fois la quantité contenue actuellement dans l'atmosphère

Si seulement 10% des silicates calciques sont altérés : **136,8** fois la quantité contenue actuellement dans l'atmosphère

L'érosion de la chaîne hercynienne aurait fixé plus de 100 fois la quantité de CO₂ atmosphérique actuelle

Estimation de la quantité de CO₂ fixée lors de l'érosion de la chaîne hercynienne.

Comparaison avec l'érosion de l'Himalaya



→ Surface = 668 000 Km²

Cette quantité de CO₂ correspond a **341** fois la quantité contenue actuellement dans l'atmosphère

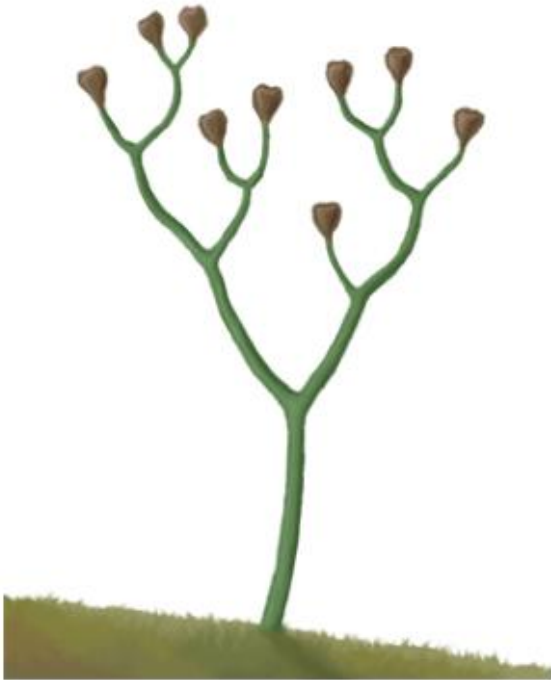
Si seulement 10% des silicates calciques sont altérés : **34,1** fois la quantité contenue actuellement dans l'atmosphère

L'érosion d'une même épaisseur d'Himalaya fixerait près de 34 fois la quantité de CO₂ atmosphérique actuelle

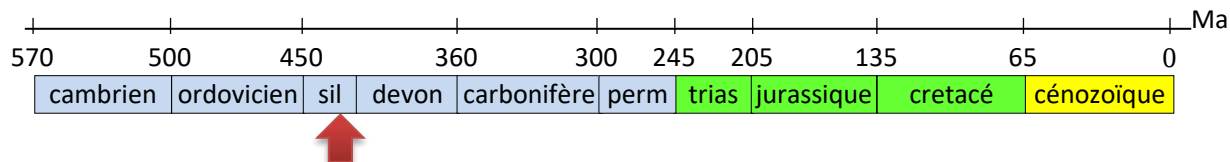
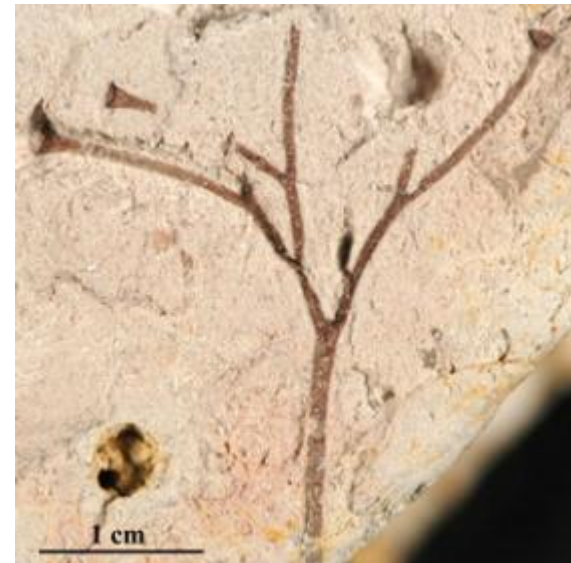
Pour des processus d'érosion équivalents, l'érosion de la chaîne hercynienne aurait fixé 4 fois plus de CO₂ que pourrait fixer l'érosion de l'Himalaya

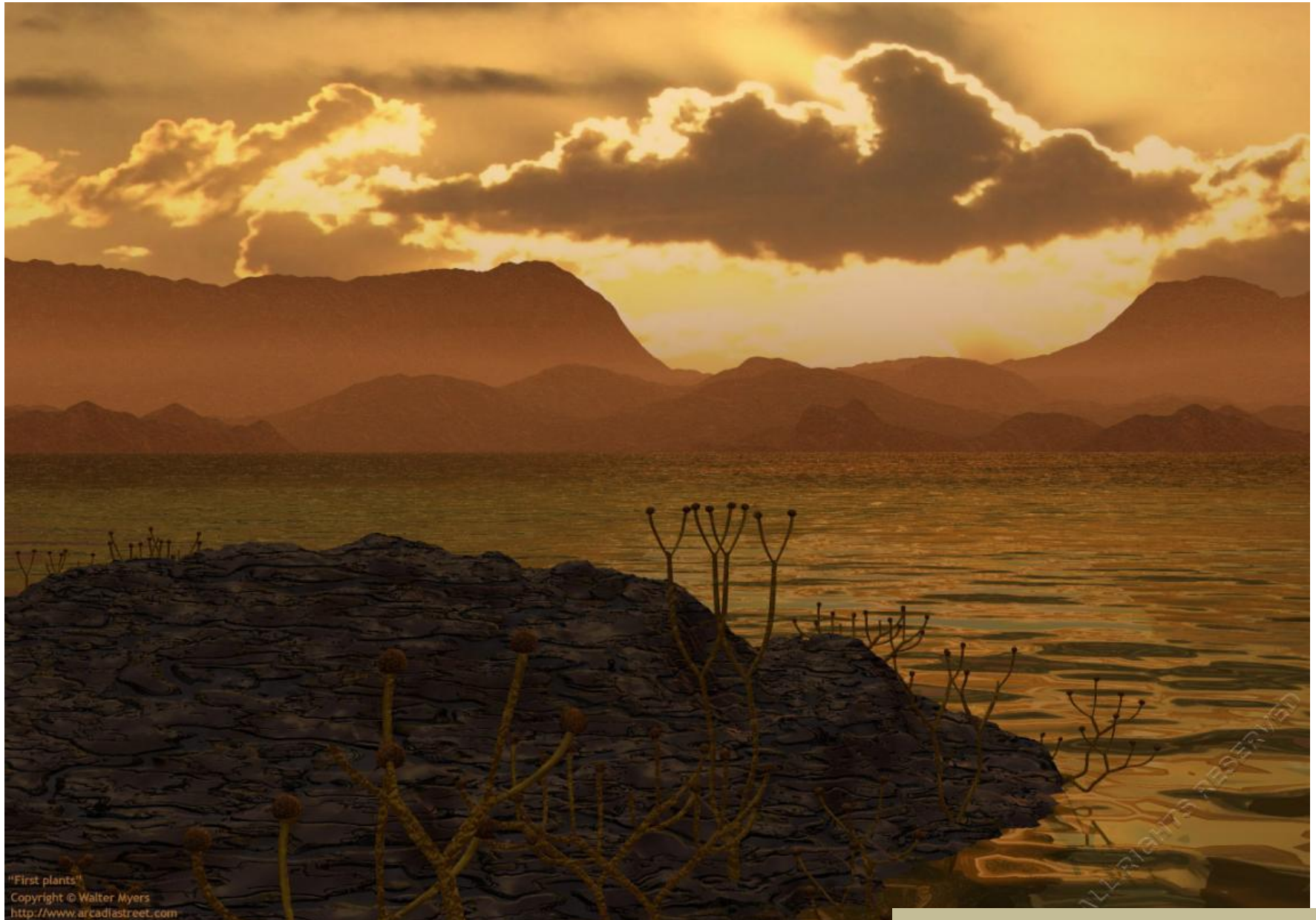
-425 Ma

Reconstitution de Cooksonia



Le genre *Cooksonia* est la plus ancienne plante vasculaire connue. Des fossiles ont été trouvés dans une région allant de la Sibérie à l'est des États-Unis et au Brésil.



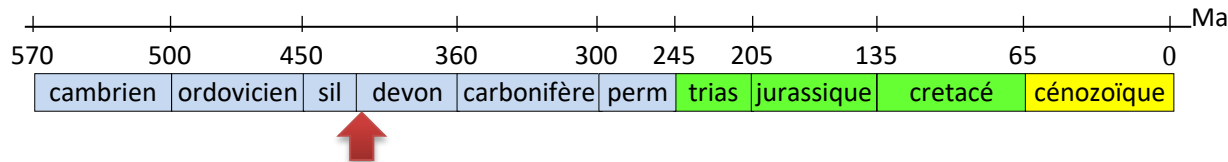
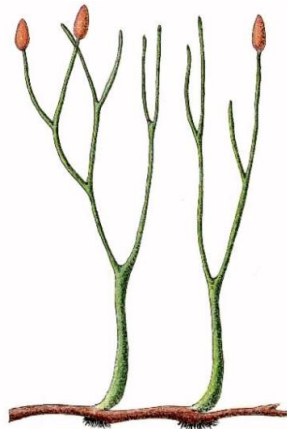


"First plants"
Copyright © Walter Myers
<http://www.arcadiastreet.com>

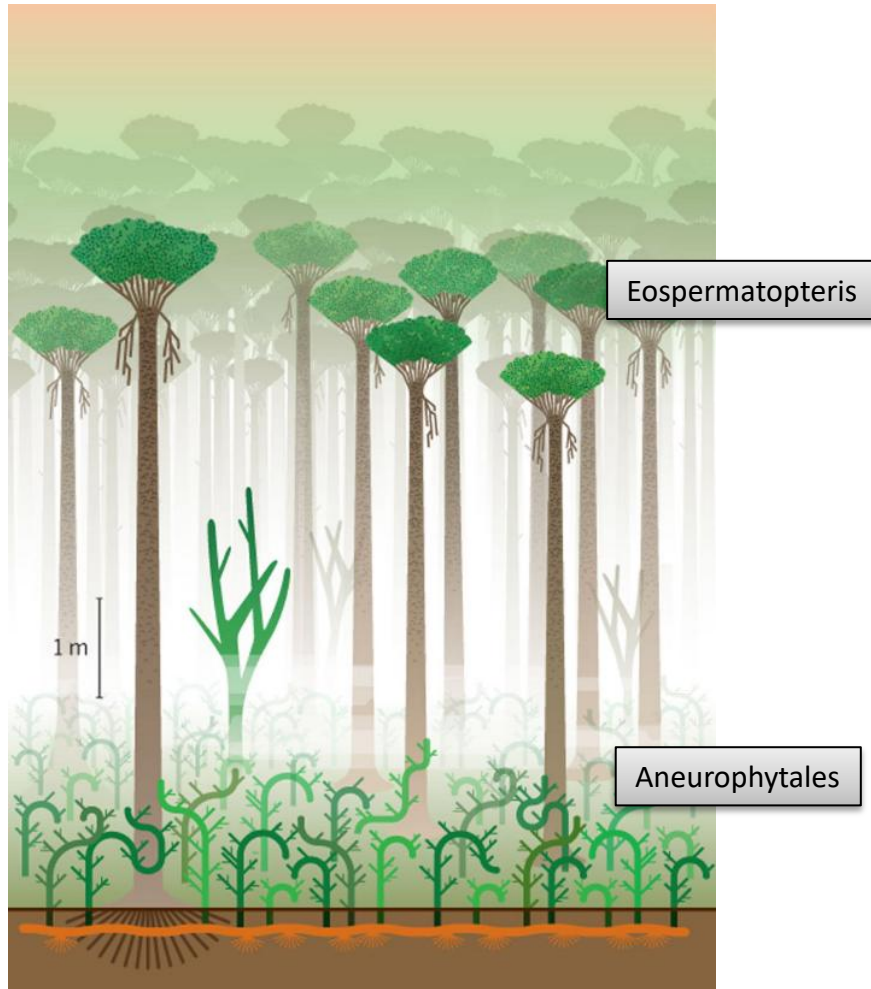
-411 Ma



Cross section through an axis of *Rhynie gwynne-vaughanii*



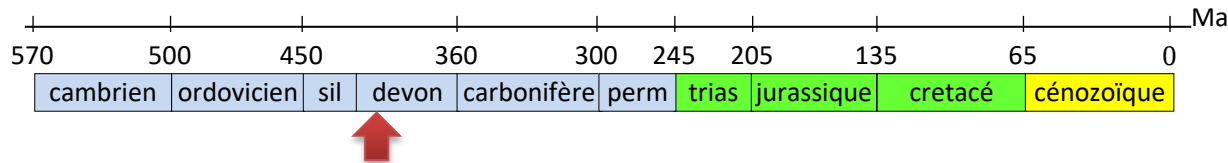
Reconstitution de la forêt de Gilboa



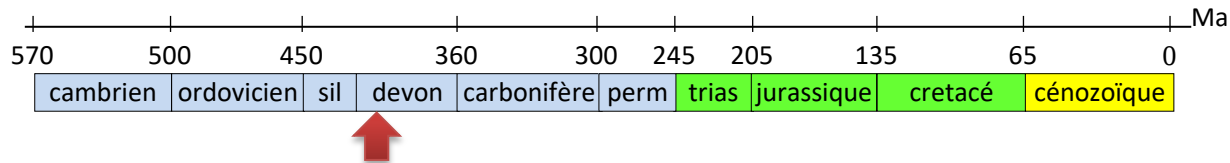
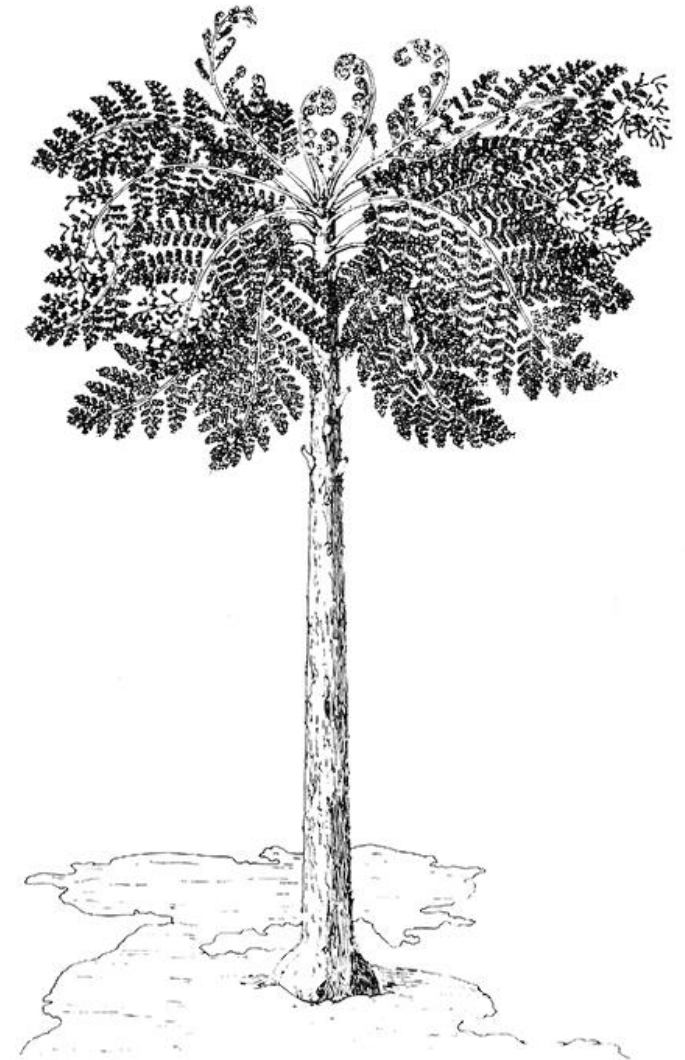
1920: Dans la carrière de Riverside (Riverside Quarry) et, près de la ville de Gilboa (Etat de New York), ont été découverts de grands troncs transformés en moulages de grès. La formation gréseuse a ainsi livré la plus ancienne forêt fossile connue. L'espèce productrice des troncs fut baptisée Eospermatopteris.

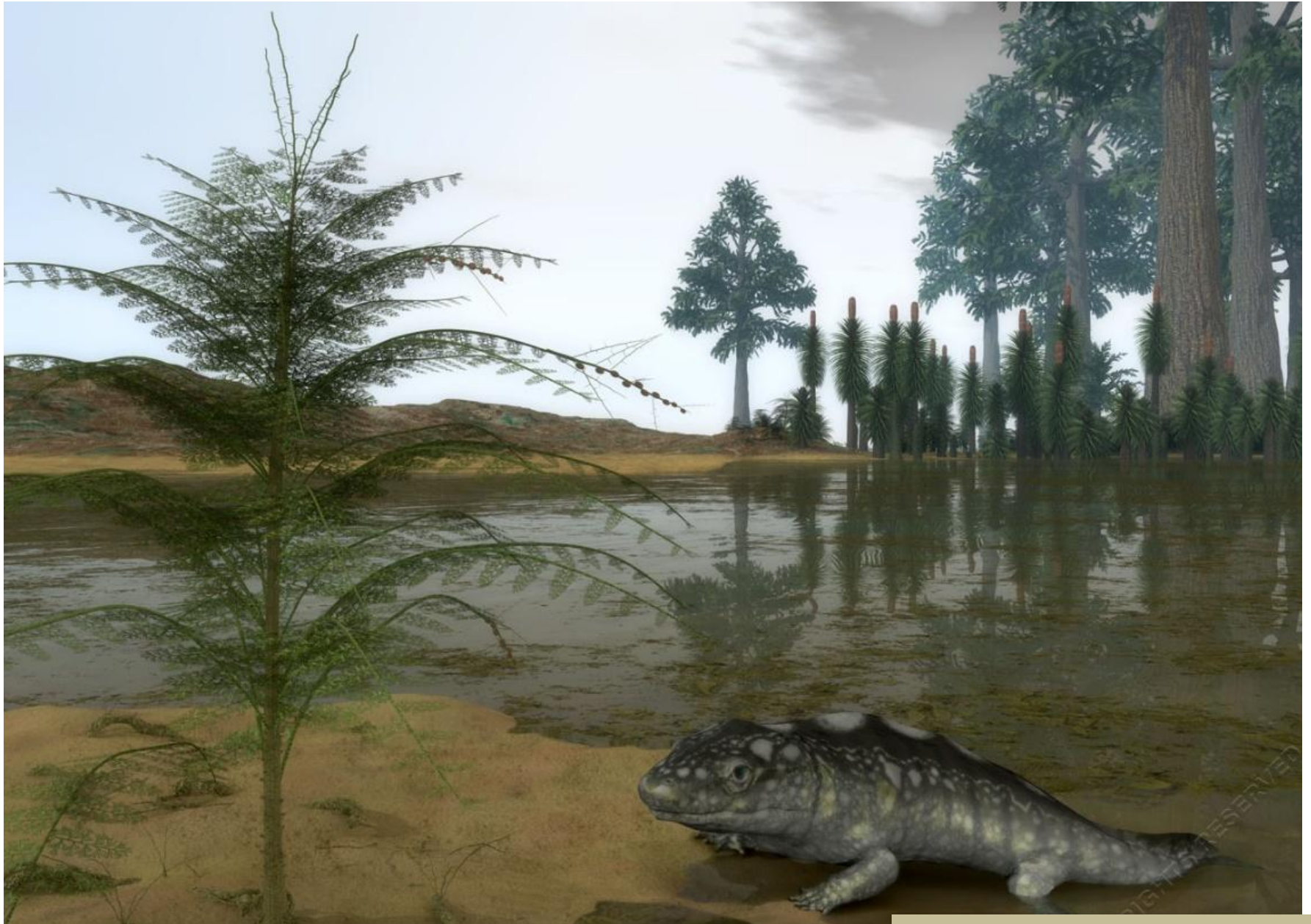
En 2007, d'autres fragments végétaux exhumés sur ce site (des tiges et des feuilles) furent identifiés comme des portions de la même plante .

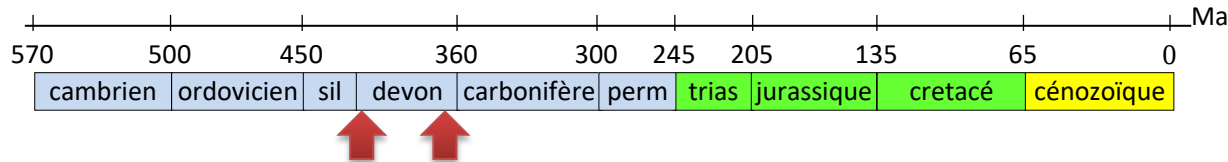
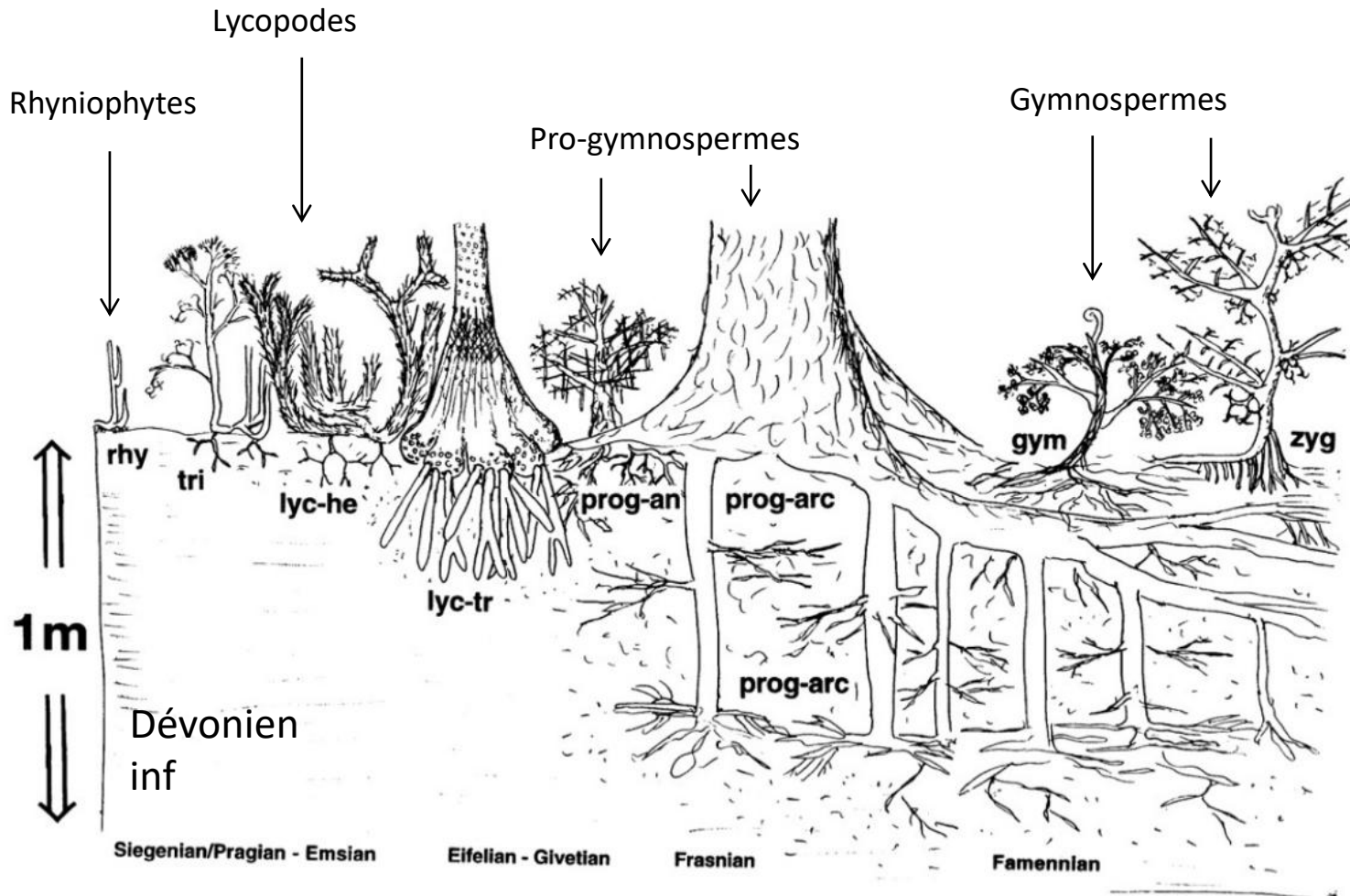
Eospermatopteris était un végétal arborescent pouvant dépasser 6 m de hauteur, au tronc vertical, rectiligne, terminé par une couronne de feuille courtes. L'espèce est maintenant attribuée à la classe éteinte des Cladoxylopsides (Cladoxylopsida), proche des fougères.



Tronc fossile et reconstitution d'Eospermatopteris





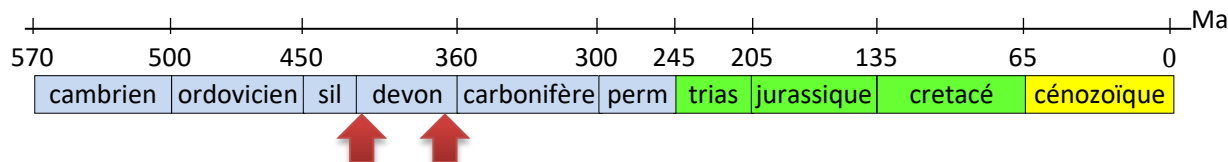


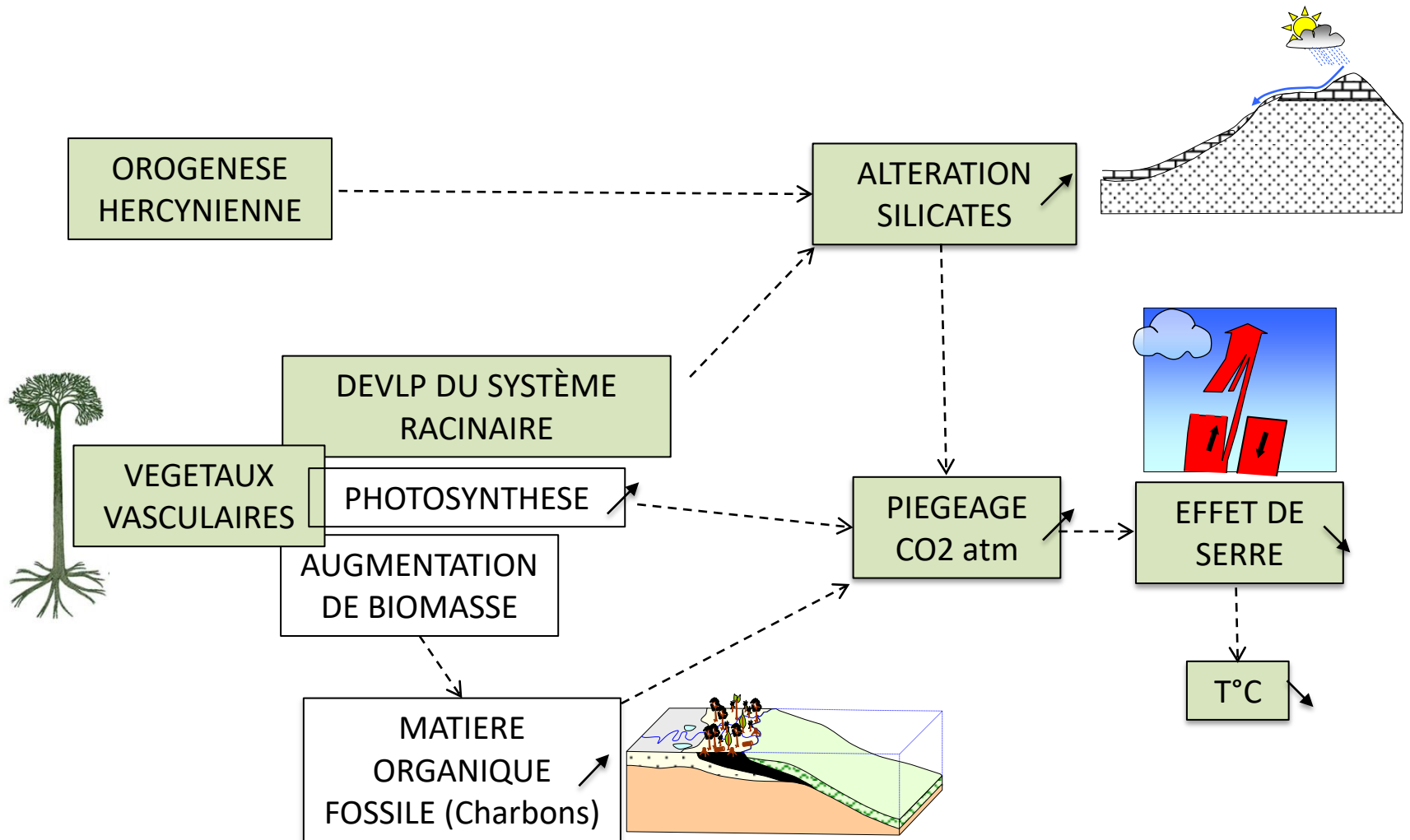
Evolution climatique (Silurien → Permo-Carbonifère)



Les végétaux vasculaires (avec qui apparaissent les premières "racines") colonisent le milieu continental jusqu'alors occupé par des tapis d'algues et de lichens primitifs. On constate grâce aux archives paléontologiques que le taille et la profondeur des racines augmentent jusqu'au Dévonien terminal avec un enracinement déjà profond dès le Dévonien inférieur (-390 Ma)

Cet enracinement profond aura eu pour effet le plus évident, une apparition de fractures dans les roches du sous-sol qui augmente la "surface d'attaque" et accélère ainsi l'altération par l'eau.



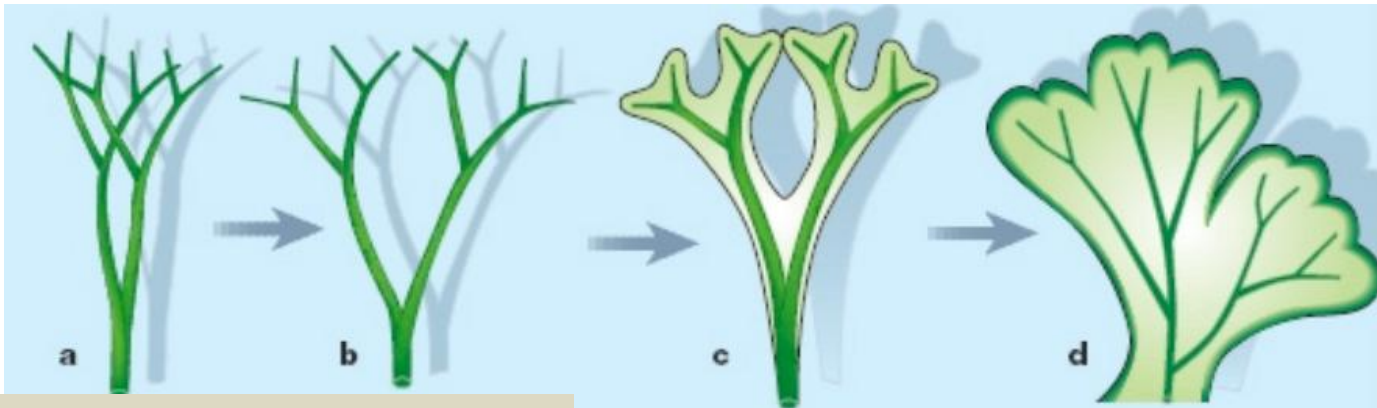


Un indice biologique pour estimer la quantité de CO₂ atm passée

Evolution anatomique des plantes vasculaires

SILURIEN

CARBONIFERE



D'après Kenrick P., Nature 2001

Plantes à forme simple,
tubulaires, peu ramifiées, sans
feuilles

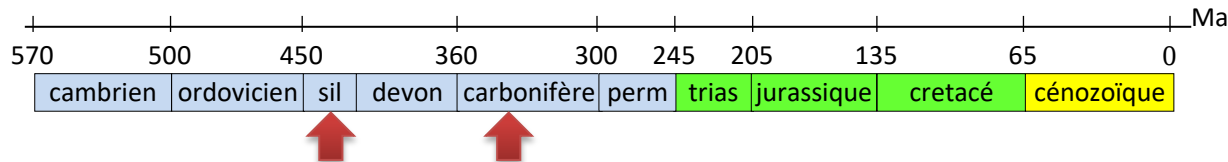
Apparition des feuilles

Augmentation de la surface foliaire

Corrélation ?

Chaud et sec

Plus froid



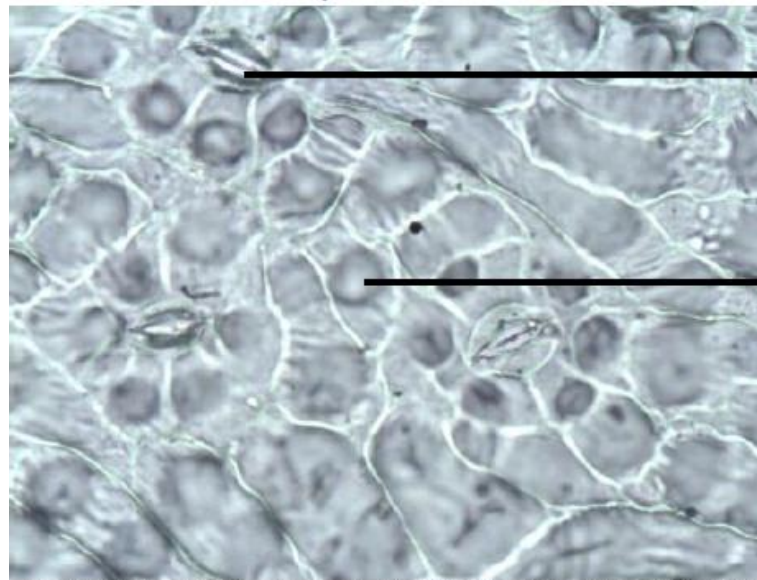
Un indice biologique pour estimer la quantité de CO₂ atm passée

Relation entre densité stomatique, photosynthèse, transpiration et CO₂

Sujet ECE

Principe d'actualisme:

-On connaît certaines espèces qui ont peu évolué et chez lesquelles on a pu établir une corrélation entre le taux de CO₂ atmosphérique et l'indice stomatique (Ex: Ginkgo biloba)



Microphotographie réalisée à partir d'une empreinte d'épiderme de feuille de *Ginkgo biloba* actuel

VIDEOMICROSCOPIE

MESURIM

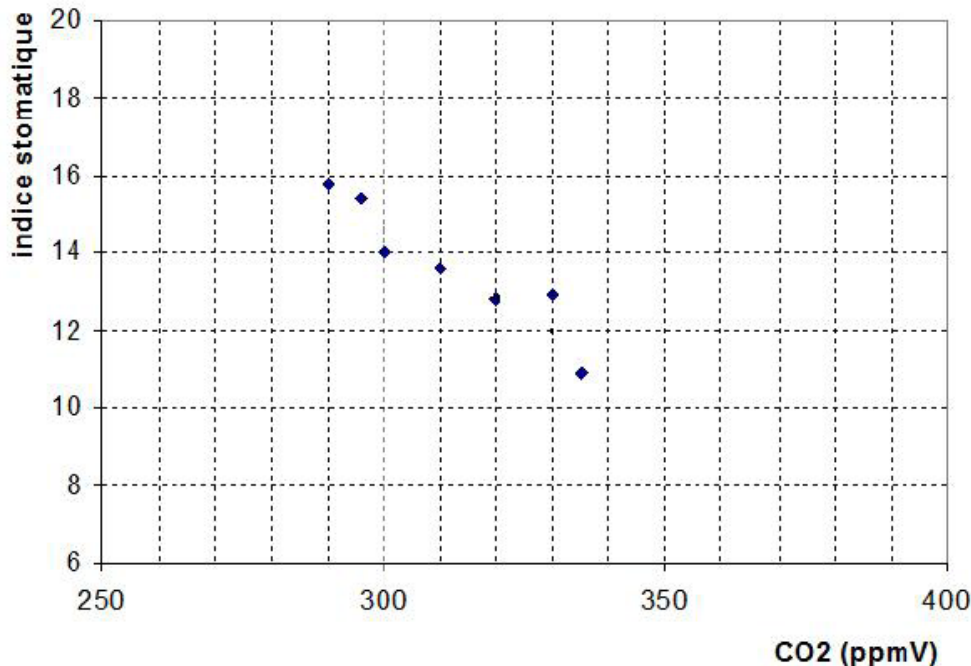
Un indice biologique pour estimer la quantité de CO₂ atm passée

Relation entre densité stomatique, photosynthèse et CO₂

Sujet ECE

Principe d'actualisme:

-On connaît certaines espèces qui ont peu évolué et chez lesquelles on a pu établir une corrélation entre le taux de CO₂ atmosphérique et l'indice stomatique (Ex: Ginkgo biloba)



Relation entre le taux de CO₂ et l'indice stomatique de feuilles du Ginkgo biloba
D'après Royer et al (2001, Science, 292 : 2310-2313)

Ce graphique a été obtenu au laboratoire sous atmosphère contrôlée en CO₂. La teneur en CO₂ est mesurée en ppmV (parties par million en volume) et l'**indice stomatique correspond au pourcentage de stomates dénombré sur la face inférieure des feuilles par rapport au nombre total de cellules épidermiques**. Les deux cellules stomatiques ne comptent que pour un stomate.

La relation entre l'indice stomatique et le taux de CO₂ atmosphérique semble être assimilable à une droite.

Rappelons que la teneur actuelle en CO₂ est de 370 ppmv.

Le Ginkgo est une espèce qui a traversé les temps géologiques et on fait l'hypothèse que les résultats actuels peuvent s'appliquer aux fossiles.

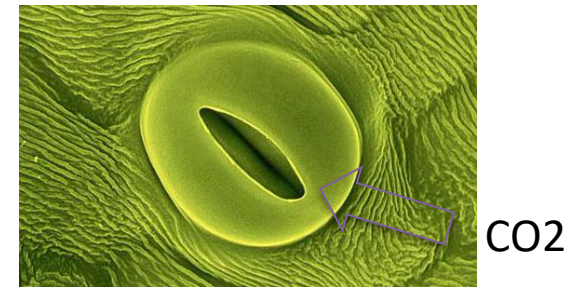
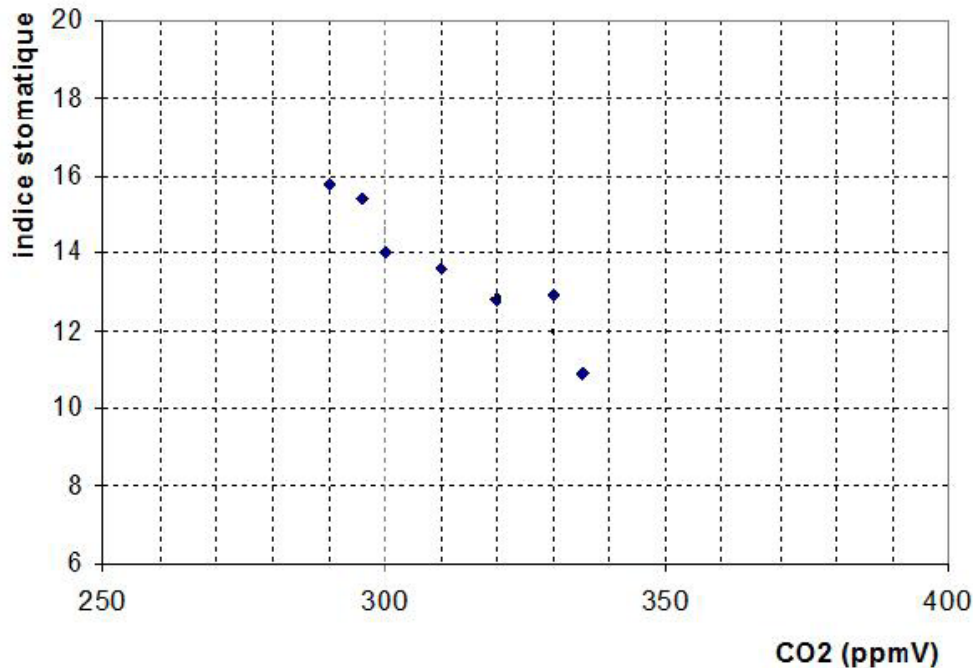
Un indice biologique pour estimer la quantité de CO₂ atm passée

Relation entre densité stomatique, photosynthèse et CO₂

Sujet ECE

Principe d'actualisme:

-On connaît certaines espèces qui ont peu évolué et chez lesquelles on a pu établir une corrélation entre le taux de CO₂ atmosphérique et l'indice stomatique (Ex: Ginkgo biloba)



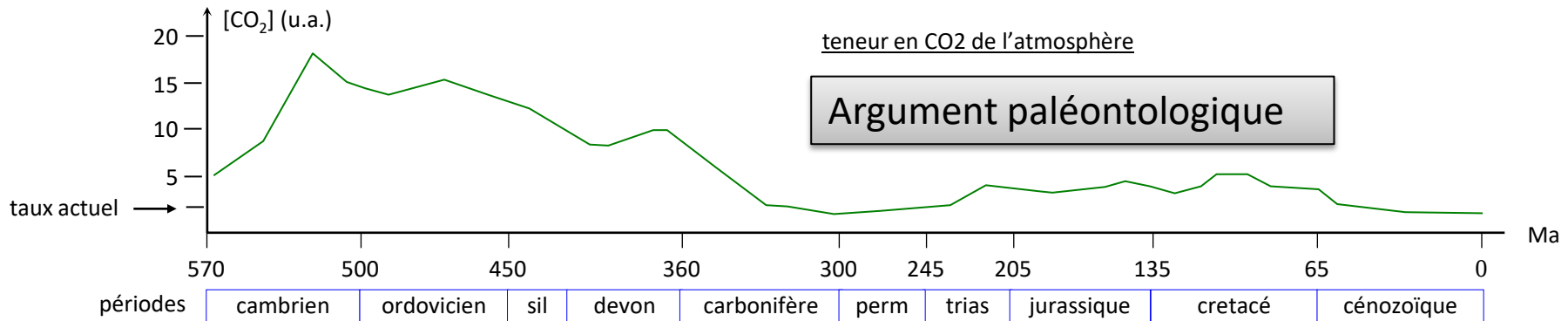
C'est par les stomates que s'effectue l'entrée de CO₂ pour la photosynthèse.

Plus la teneur atmosphérique en CO₂ est faible, plus le nombre de stomates par unité de surface augmente.

Un indice biologique pour estimer la quantité de CO₂ atm passée

Relation entre densité stomatique, photosynthèse et CO₂

La mesure de l'indice stomatique sur des végétaux fossiles, par comparaison aux végétaux actuels, permet d'**estimer** le taux de CO₂ atmosphérique



Evolution climatique (Silurien → Permo-Carbonifère)

Relation entre biosphère, cycle du C et O₂

Quelques Remarques



Que devient la biomasse végétale ?

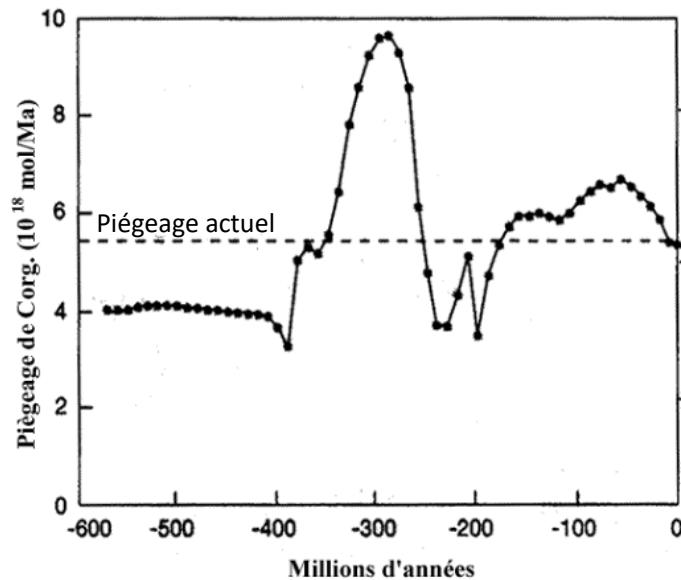
ou



Dans ce cas, moins d'O₂ consommé

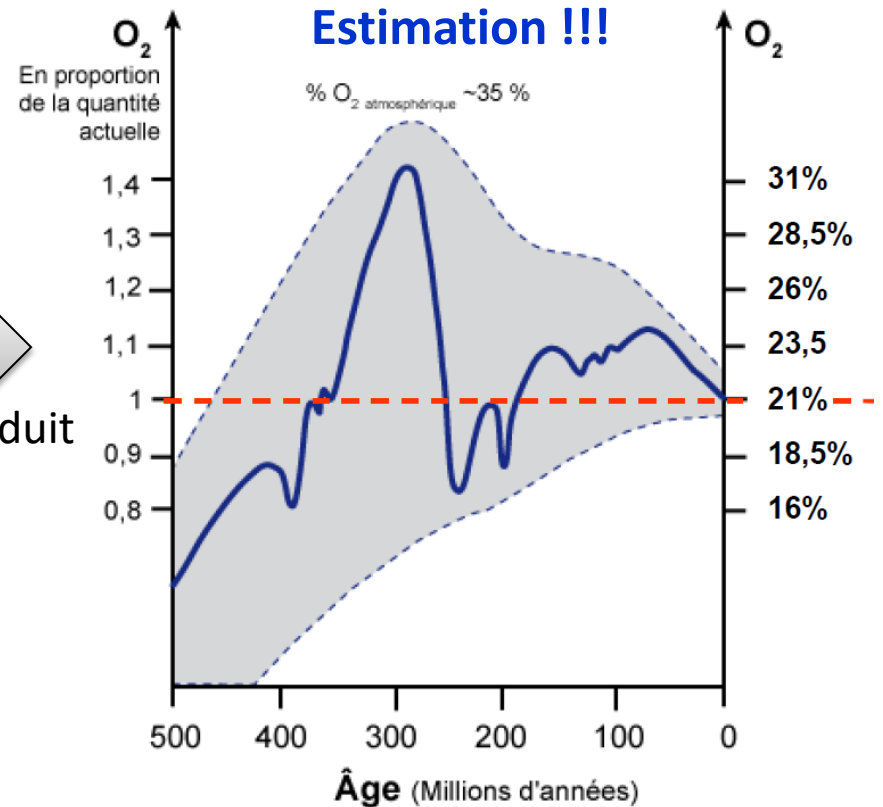
Relation entre biosphère, cycle du C et O₂

Estimation de la quantité de carbone organique piégé basée sur la mesure du rapport ¹²C/¹³C:



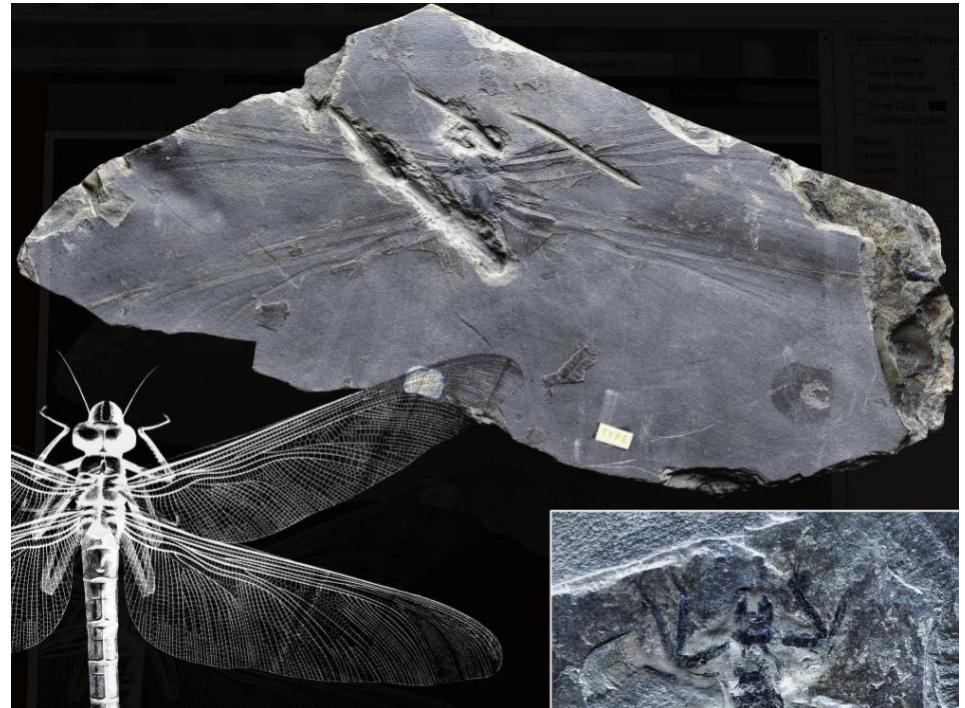
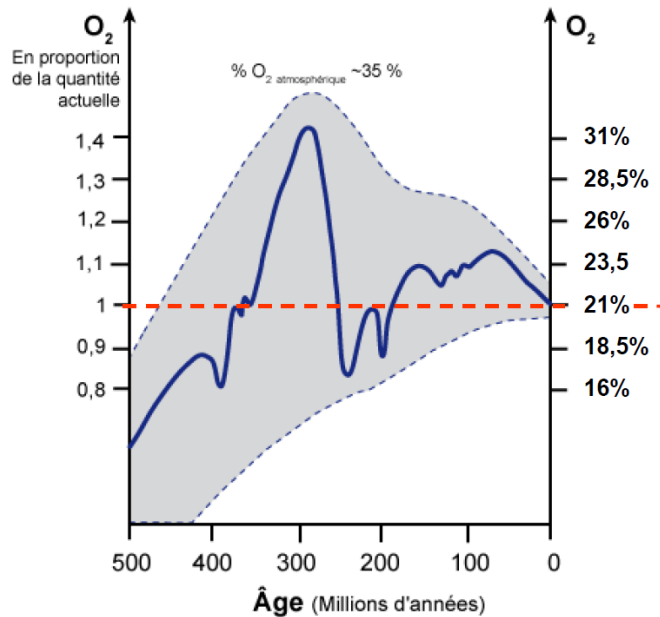
D'après Sciences de la Terre et de l'Univers Collectif, Vuibert, août 1999

On en déduit



- 1) Activité photosynthétique importante → production accrue d'O₂
- 2) Si la matière organique est fossilisée, elle ne peut être oxydée → l'O₂ est peu consommé et s'accumule dans l'atmosphère

Relation entre biosphère, cycle du C et O₂



Meganeura : empreinte fossile (© S. Charbonnier/MNHN) - C'est dans une mine de charbon de l'Allier, en France, que ce spécimen de libellule géante fossile a été découvert au XIXe siècle. 75 cm

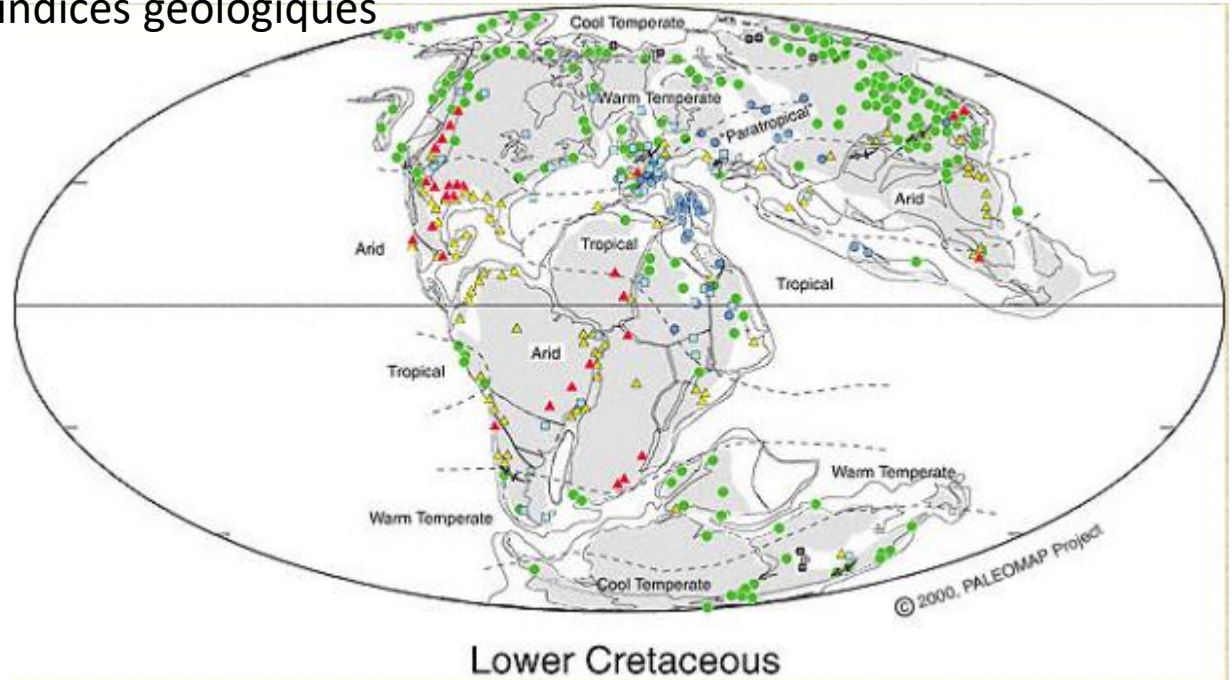
Pour que d'énormes insectes puissent voler, il faut 50 fois plus d'O₂ que la teneur actuelle !!!

Cette relation explicative très répandue est controversée, car les plus grands Méganeurides sont plus tardifs, et des périodes plus récentes, caractérisées par de plus faibles taux atmosphériques d'oxygène, ont aussi vu l'apparition d'insectes de grande taille. Les causes du gigantisme des Méganeurides sont donc toujours inconnues (absence de prédateurs ?....)

Coup de chaud au Crétacé !

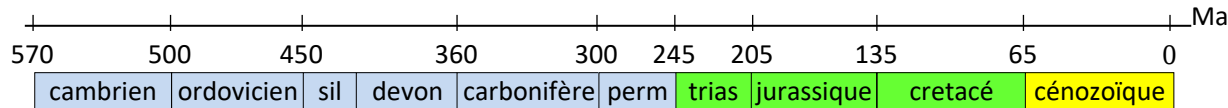
Coup de chaud au Crétacé !

Les indices géologiques



Absence de tillites

Abondance des évaporites, bauxites et charbon, même dans les latitudes élevées

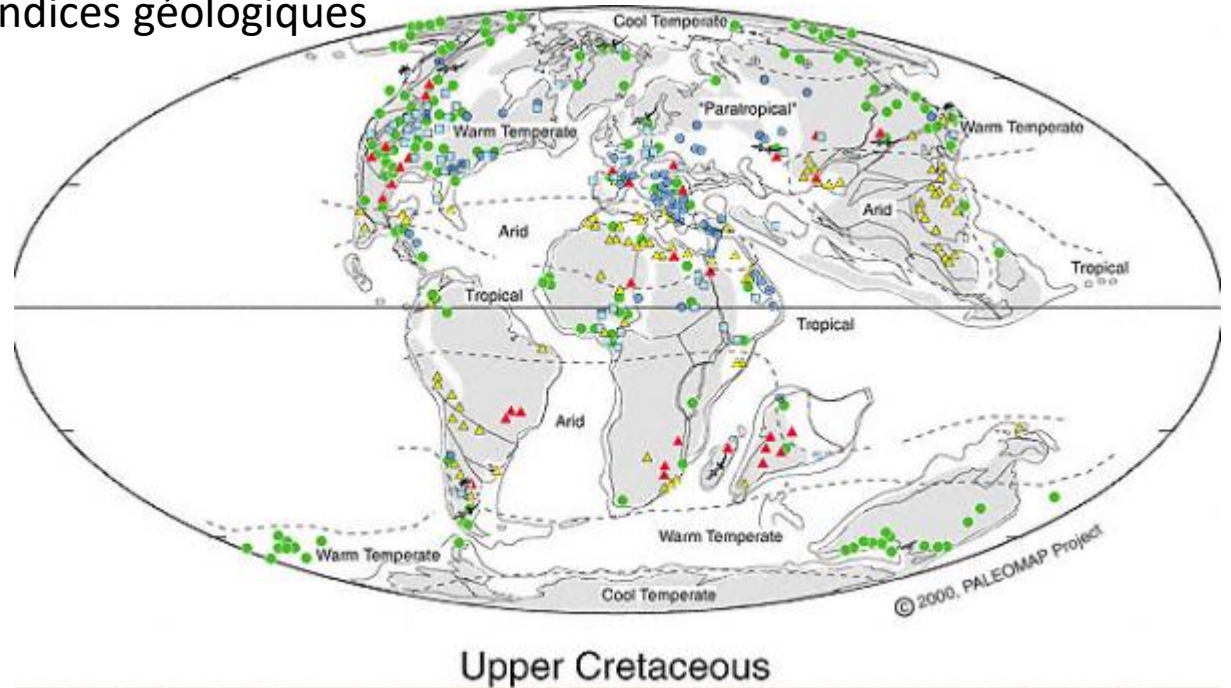


	WARM	COOL
WET	<i>Tropical</i> Coal Bauxite Laterite	<i>Cool Temperate</i> Coal & Tillites
	<i>Warm Temperate</i> Kaolinite (& coal & evaporite) Crocodiles Palms & Mangroves	
DRY	<i>Arid</i> Evaporite Calcrete	<i>Cold</i> Tillite Dropstone Glendonite

"Paratropical" = High Latitude Bauxites

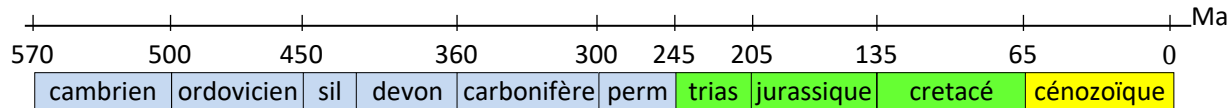
Coup de chaud au Crétacé !

Les indices géologiques



Absence de tillites

Abondance des évaporites, bauxites et charbon, même dans les latitudes élevées



	WARM	COOL
WET	<i>Tropical</i> ● Coal ● Bauxite ● Laterite	<i>Cool Temperate</i> ● Coal & Tillites
	<i>Warm Temperate</i> ■ Kaolinite (& coal & evaporite) 🌴 Crocodiles 🌴 Palms & Mangroves	
DRY	<i>Arid</i> ▲ Evaporite ▲ Calcrete	<i>Cold</i> + Tillite ⊕ Dropstone ● Glendonite

"Paratropical" = High Latitude Bauxites

Coup de chaud au Crétacé !

Un indice local intéressant: les ocre du bassin d'Apt (Albo Cénomanien)

Lithothèque

Crétacé	Supérieur		
		Coniacien	85,8– 89,3
		Turonien	89,3– 93,5
		Cénomanien	93,5– 99,6
		Albien	99,6– 112,0
		Aptien	112,0– 125,0



Lithothèque



Coup de chaud au Crétacé !

Un indice local intéressant: les ocre du bassin d'Apt (Albo Cénomannien)

Lithothèque

Sables verts du Collet de Flaqueirol



Sables ocreux de Roussillon et Rustrel



Altération dans des conditions tropicales

Smectites + quartz + glauconie

Argile TOT

Argile avec Fe^{3+}



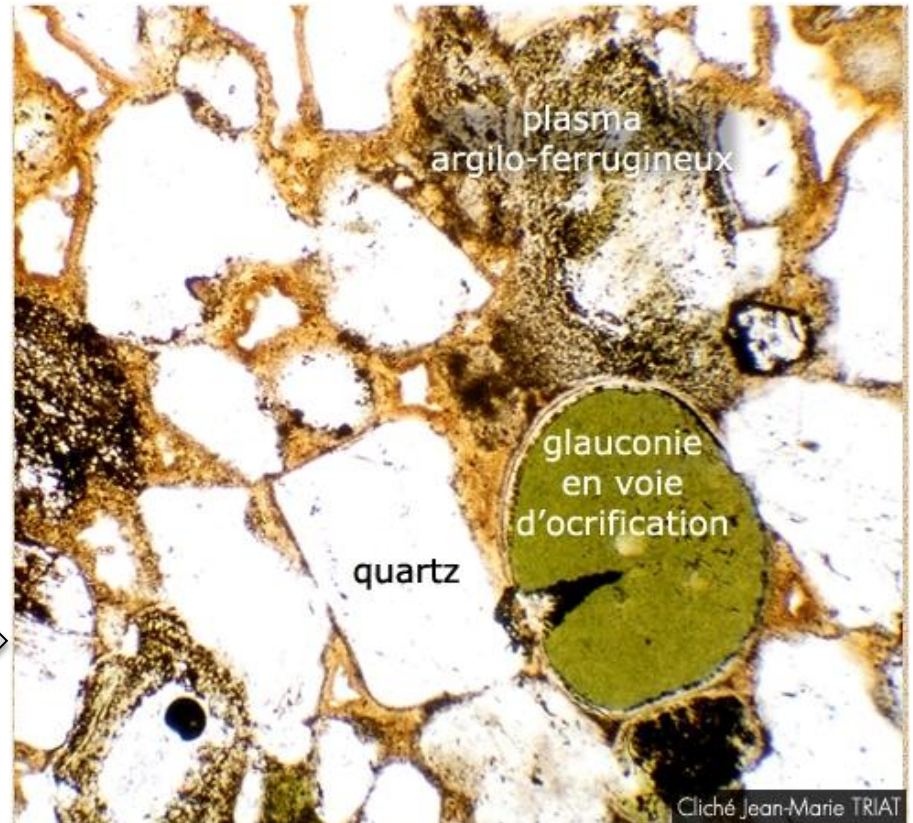
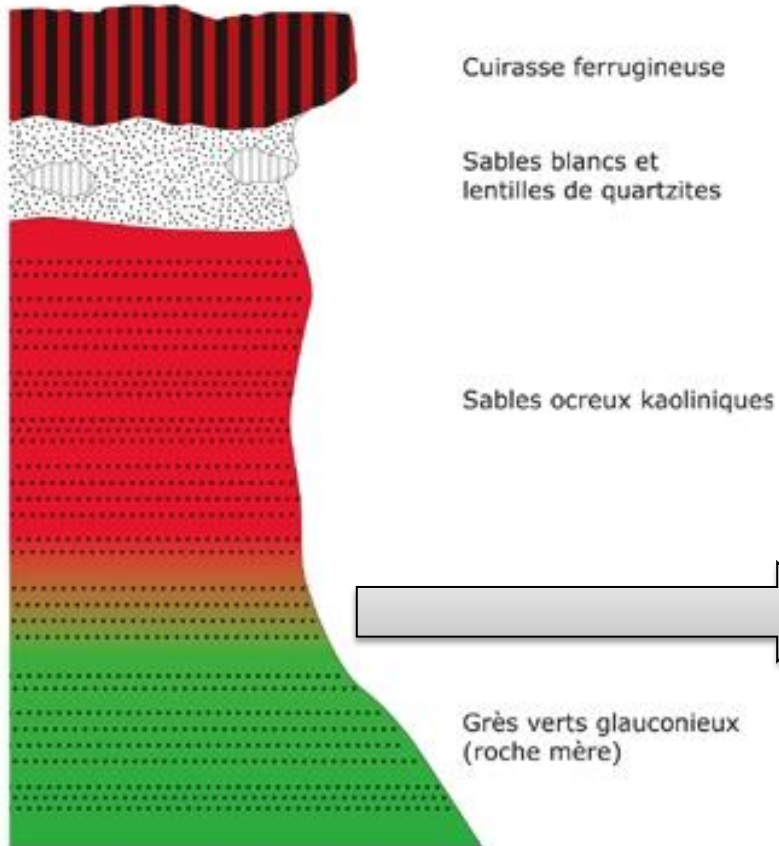
Kaolinite + quartz + Goethite et hématite

Argile TO

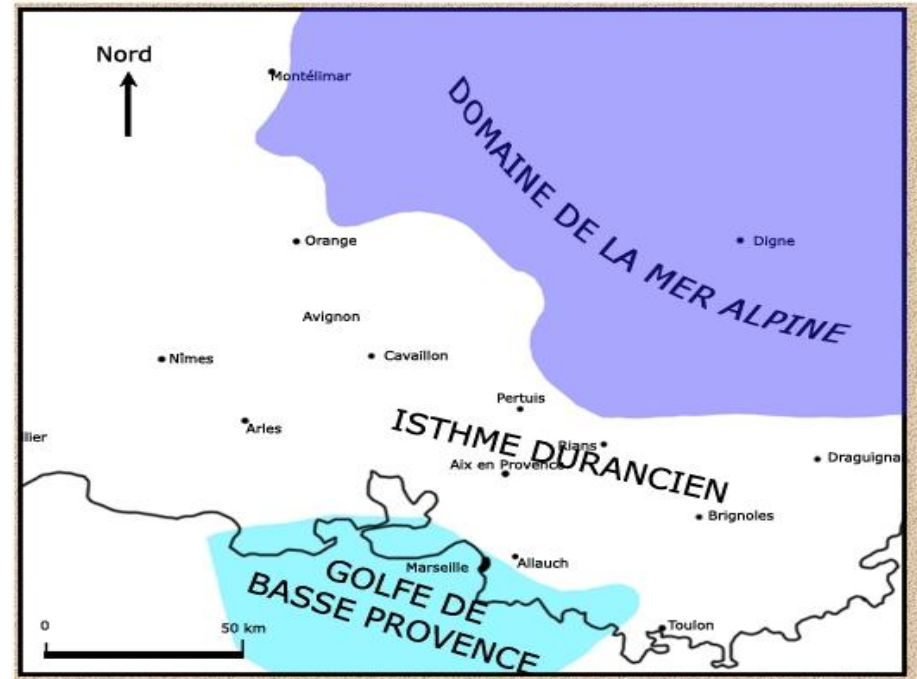
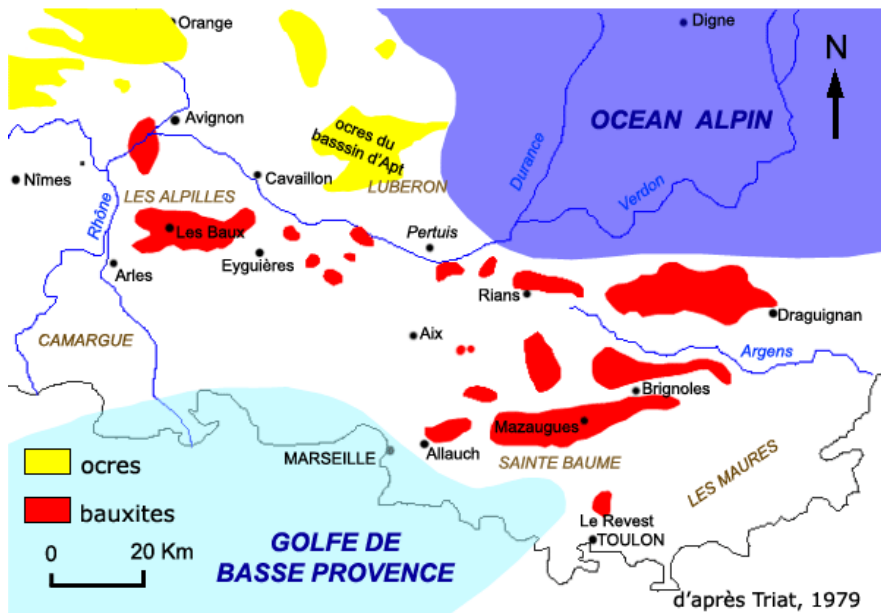
FeO(OH) Fe_2O_3

Un indice local intéressant: les ocre du bassin d'Apt (Albo Cénomannien)

COUPE TYPE DES FACIÈS D'ALTÉRATION



Un indice local intéressant: les ocres du bassin d'Apt (Albo Cénomannien)

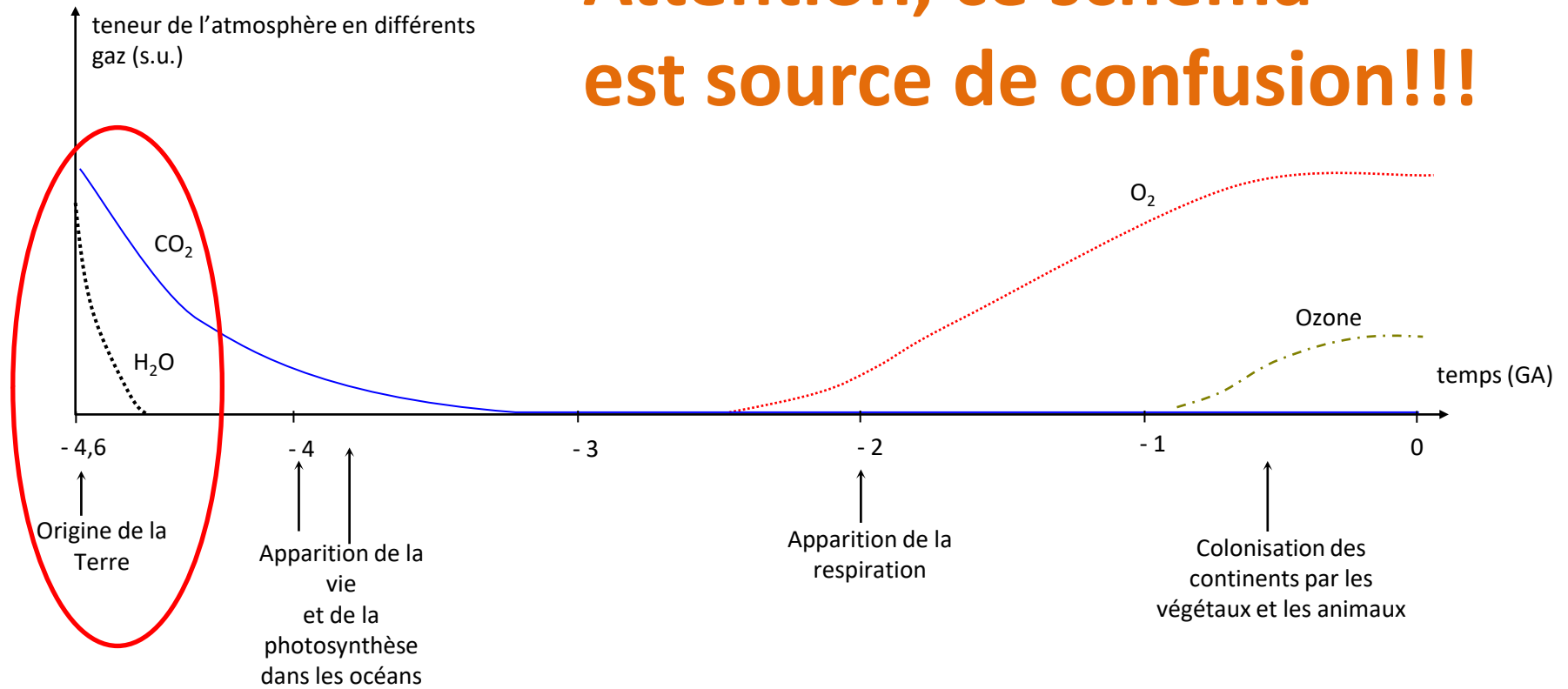


Altération continentale des grès verts glauconieux marins, suite à une émergence (bombement durancien)

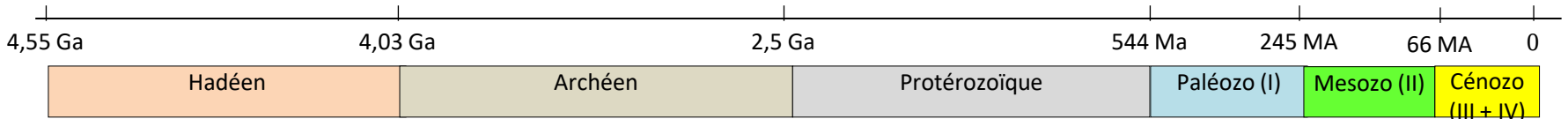
Origine et évolution de l'atmosphère terrestre

L'origine de l'atmosphère

Attention, ce schéma est source de confusion!!!



L'atmosphère primordiale est constituée majoritairement d'hydrogène et d'hélium (nébuleuse protosolaire). L'apparition de CO₂ et H₂O est déjà la manifestation d'une évolution de l'atmosphère au cours de l'Hadéen !



Pas d'archives géologiques à l'Hadéen (les plus vieilles roches datent de -4,03 Ga) !!!

On doit donc utiliser des méthodes indirectes pour établir la composition de l'atmosphère hadéenne.

EXEMPLES :

-Etude de la composition de certaines météorites (chondrites : on suppose qu'elles n'ont pas évolué depuis la formation du système solaire)

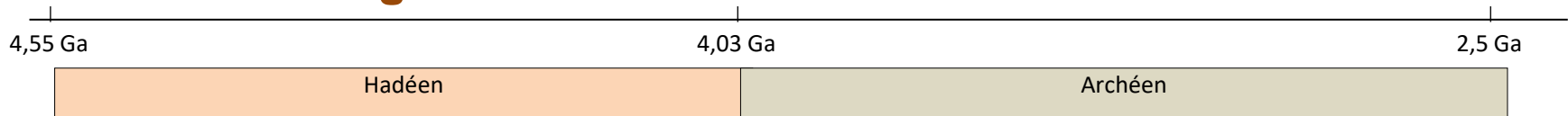


-Etude de gaz volcaniques (si on admet que le dégazage du manteau par volcanisme a participé à l'évolution de l'atmosphère)



?

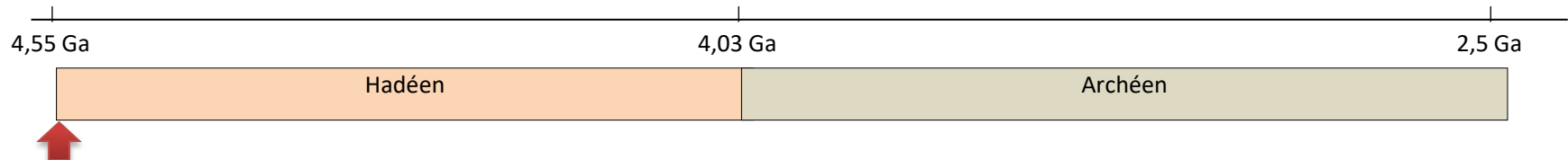
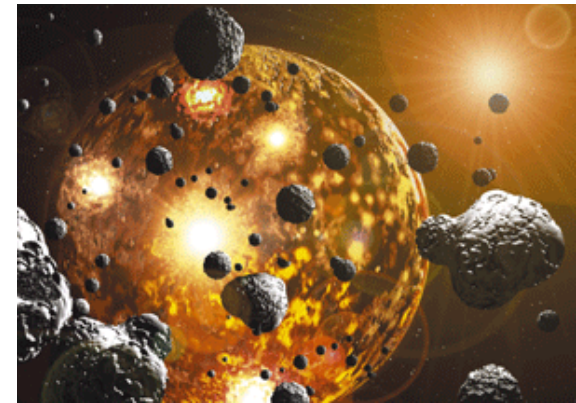
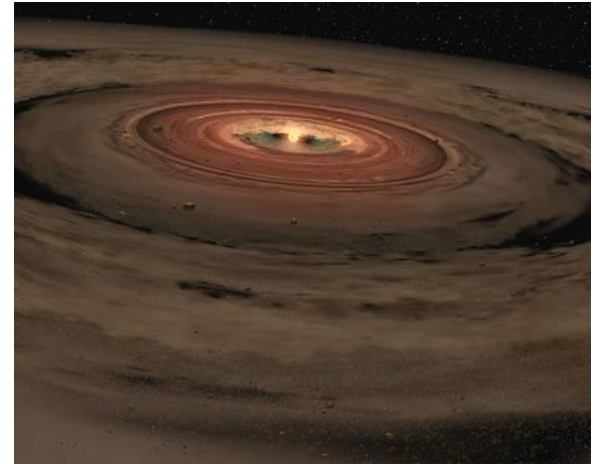
... mais il n'y a rien de sûr !!!



– **4,55 Ga:**

- Formation de la Terre (contraction de la nébuleuse protosolaire puis accrétion)
- L'atmosphère primordiale riche en He et H₂, retenue par gravité, se serait formée avant que la Terre ait achevé sa différenciation (noyau-manteau): durée de vie = 20 Ma, ce qui est très bref.

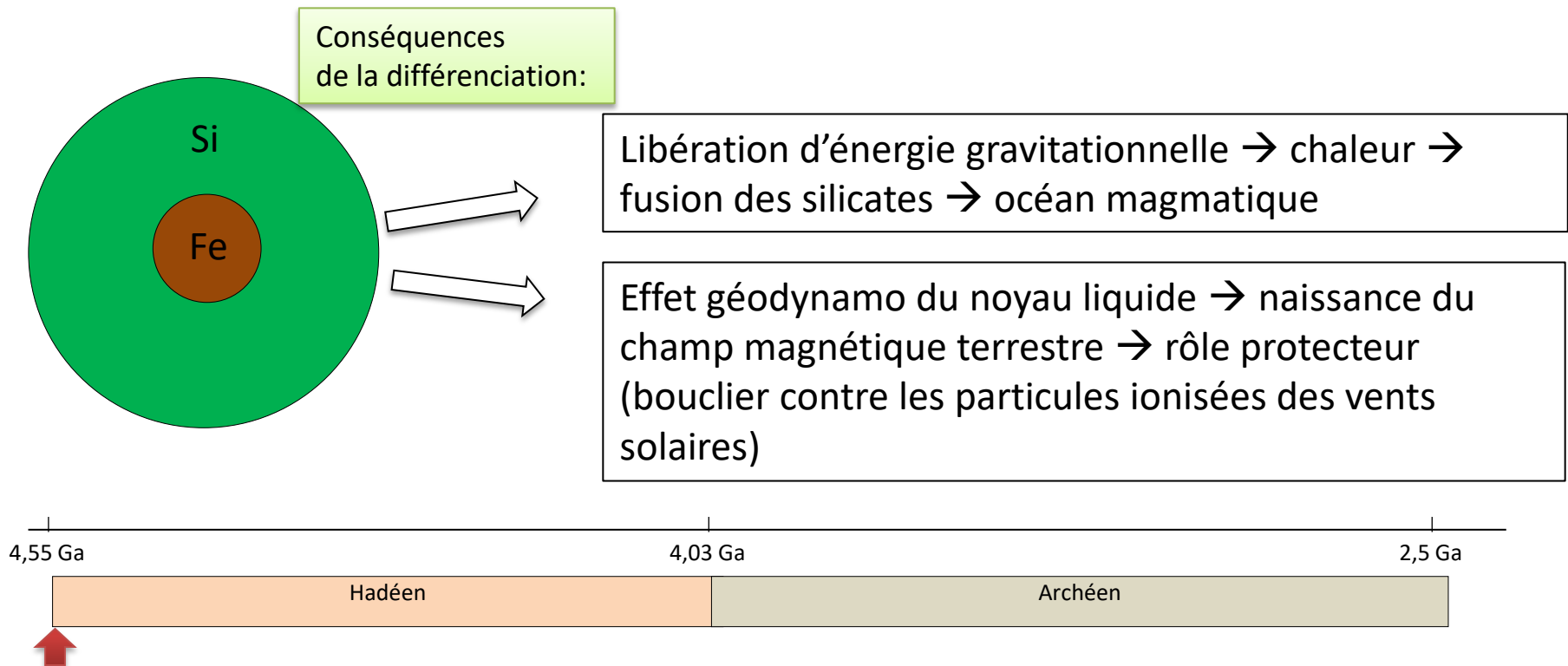
Comment expliquer la disparition de cette atmosphère primordiale ?



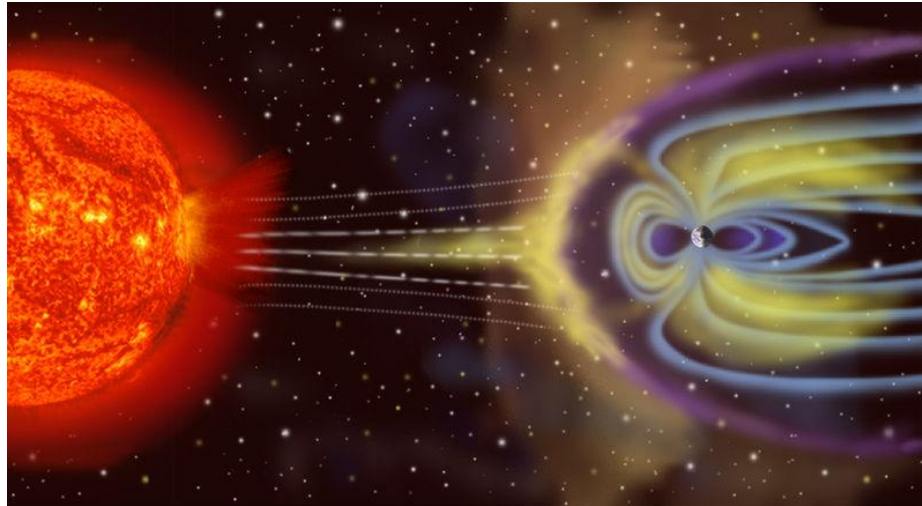
Des données isotopiques (couple Hafnium / tungstène) semblent montrer que la différenciation du noyau (plus riche en Fer) / manteau (plus riche en silice) se serait déroulée moins de 60 MA après la formation du système solaire.

Les mécanismes de séparation sont encore hypothétiques. On suppose que métal était liquide lorsqu'il a migré au centre de la planète.

Le principe général du mécanisme de séparation = phase métallique plus dense que la phase silicatée → concentration vers le centre de la planète par gravité.

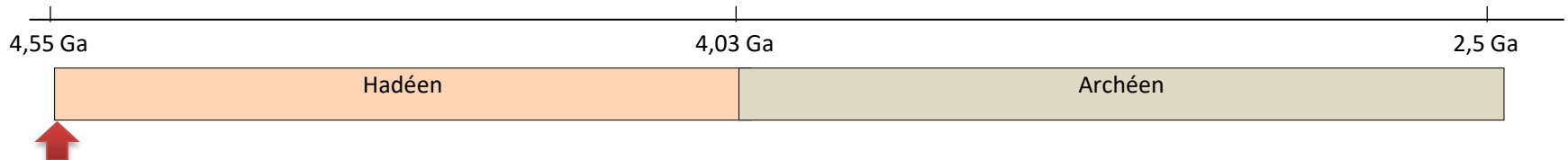


La magnétosphère agit comme un écran protecteur en s'opposant au vent solaire. En contrepartie, le vent solaire déforme le spectre magnétique de la Terre en lui donnant une forme de comète.



→ Ainsi, on suppose que l'atmosphère primordiale, formée de gaz légers (He et H₂), aurait été balayée par les vents solaires avant la mise en place du champ magnétique protecteur.

→ La différenciation de la Terre (noyau / manteau) a donc joué un rôle fondamental dans l'histoire de l'atmosphère et de la vie !



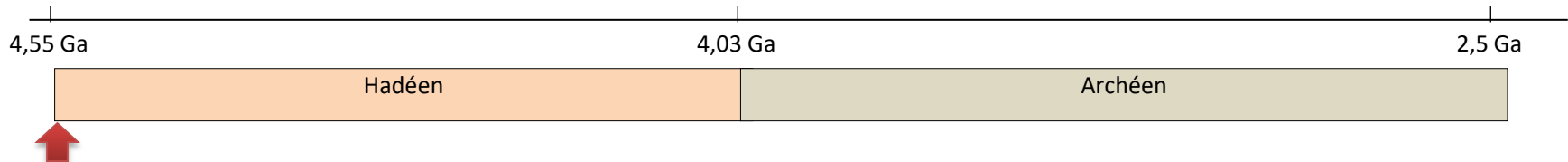
Quelques remarques:

Les planètes géantes (Jupiter, Saturne... etc), beaucoup plus massive que la Terre, ont une gravité suffisante pour retenir les gaz légers de l'atmosphère primordiale. De plus, leur éloignement les rends moins exposées aux vents solaires.



La mesure des rapports Helium / Neon au sein des dorsales reflète le rapport He / Ne du manteau. Les géochimistes ont montré que ce rapport était également proche de celui du Soleil.

Cela prouve que le manteau terrestre possède des reliques de l'atmosphère primordiale ! Une partie de cette atmosphère aurait été incorporée au manteau par dissolution dans l'océan magmatique.



Energie gravitationnelle
générée par l'accrétion

+

Libération d'énergie
due à la différenciation
noyau / manteau

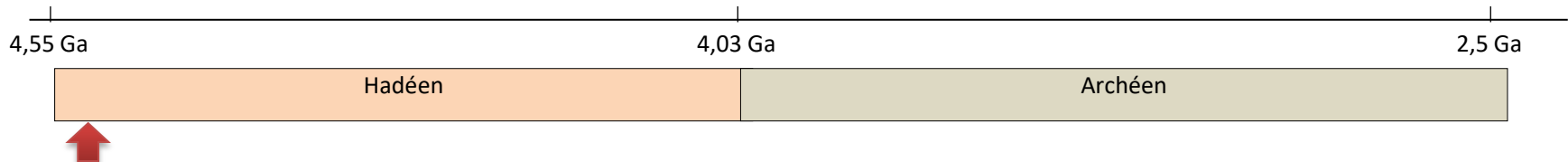
+

Désintégration des
éléments radioactifs
(énergie interne)

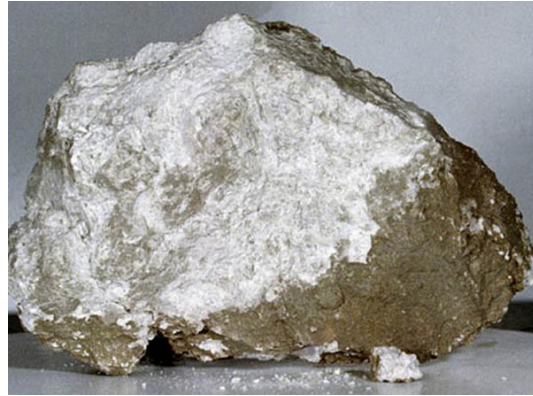
Echauffement de la
jeune Terre

Au cours des 100 premiers MA depuis la
formation de la Terre

Fusion totale de la partie
externe de la Terre (sur une
épaisseur de plusieurs
centaines de Km) = océan
magmatique



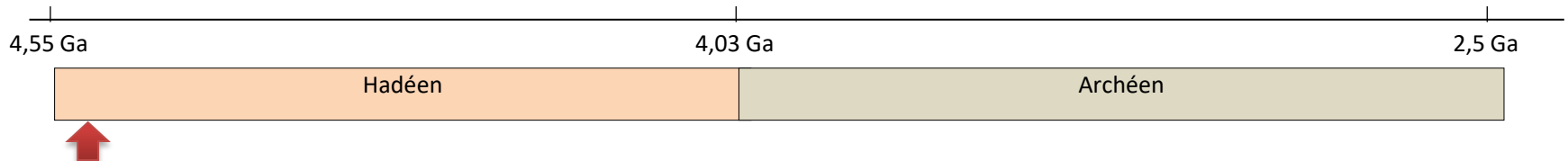
Anorthosites lunaires = roches datées de -4,45 Ga enrichies en europium et strontium (abondant dans les plagioclases chez les roches terrestres)



Basaltes des mers lunaires =
roches volcaniques appauvries
en europium et strontium

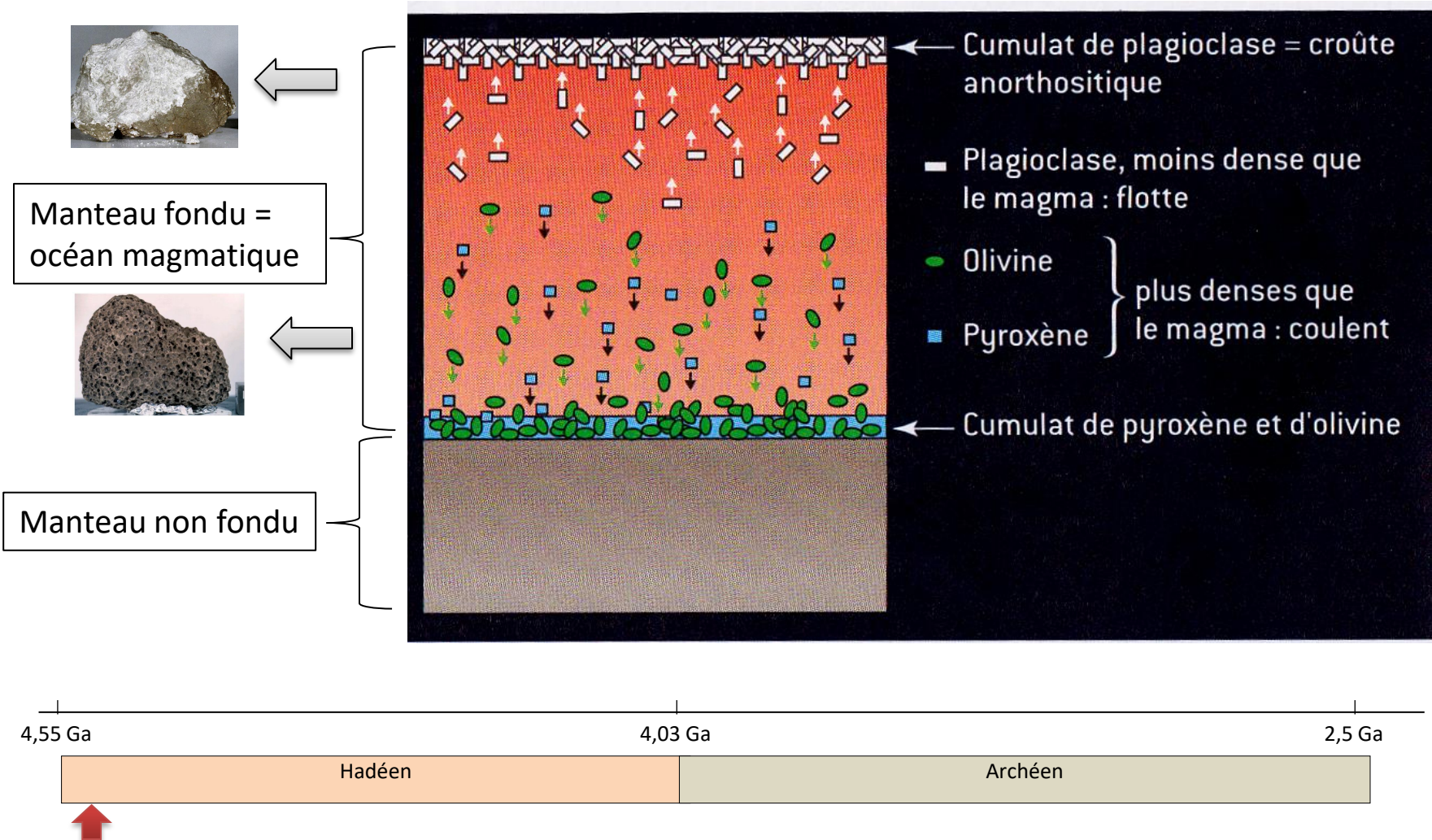


→ Complémentarité en faveur d'une différenciation à partir d'une seule source: l'océan magmatique



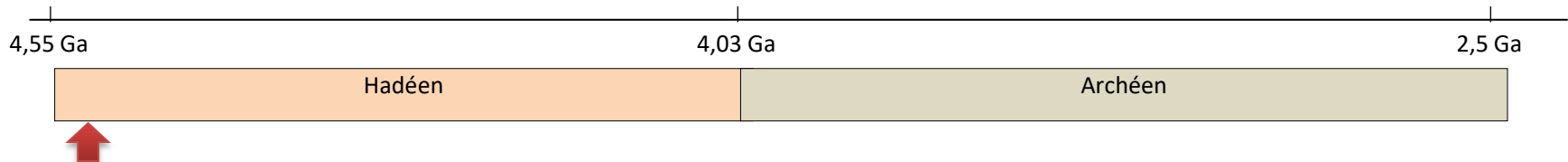
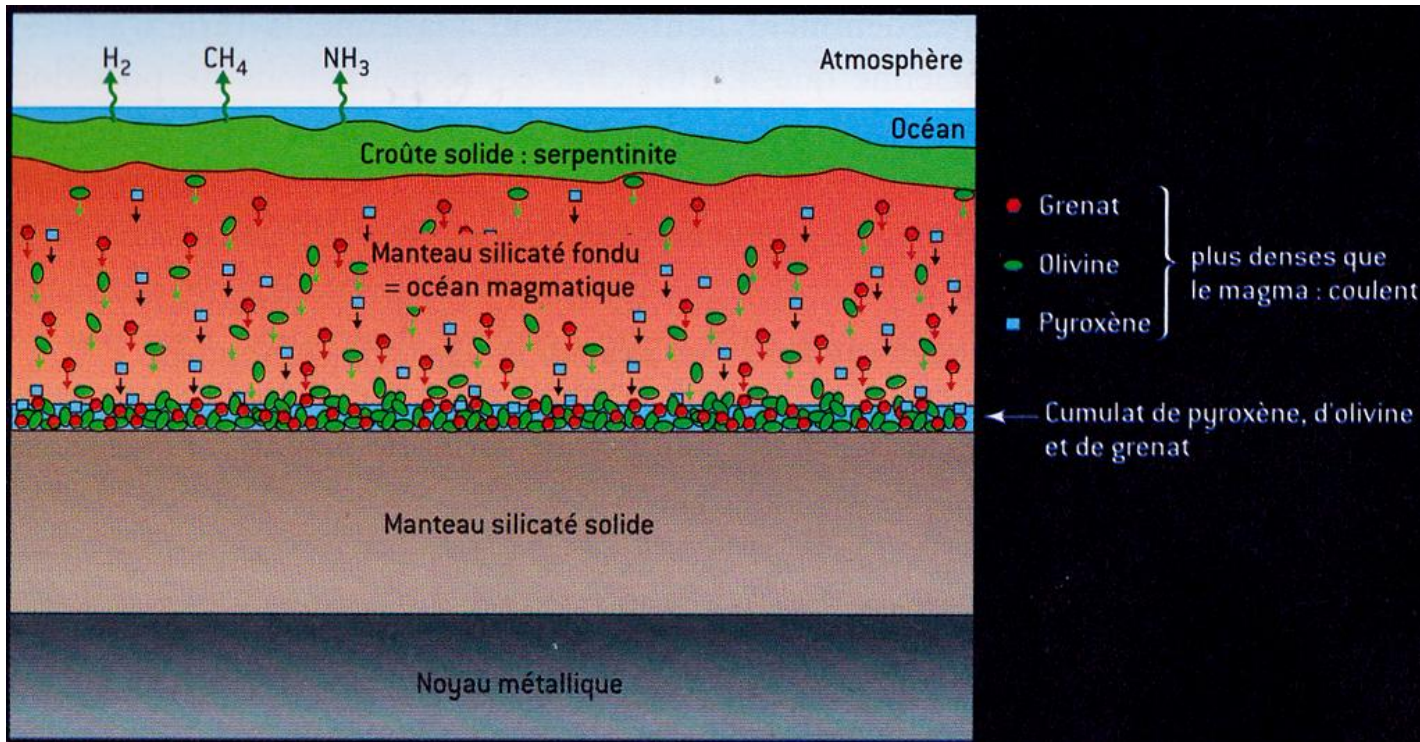
Les indices d'un fractionnement: les basaltes lunaires

Mécanisme de différenciation au sein de l'océan magmatique lunaire



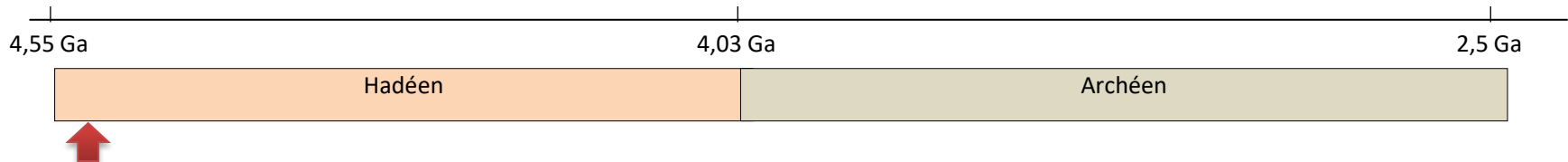
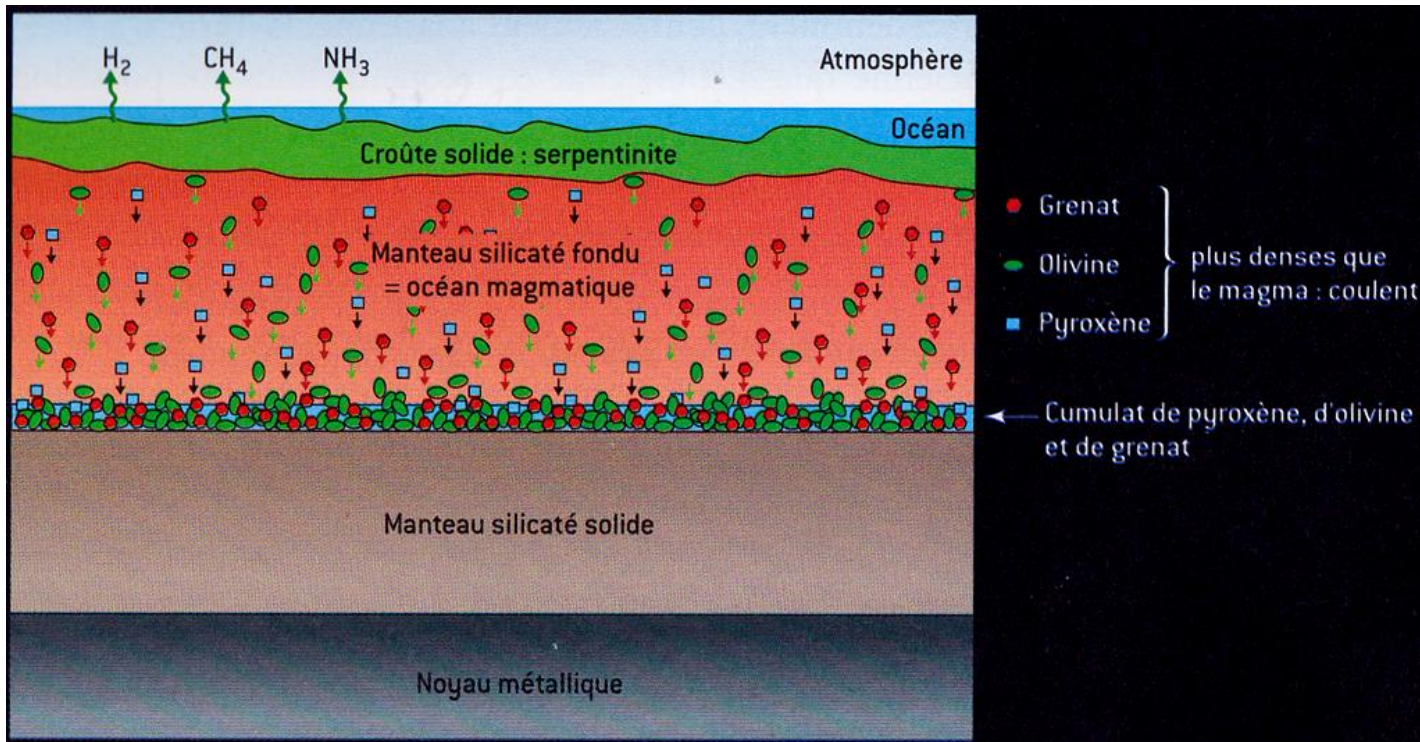
Sur Terre: Mécanisme de fractionnement au sein de l'océan magmatique

Le fractionnement aurait consisté en une accumulation de grenat, olivine et pyroxènes au fond de l'océan magmatique → stratification précoce du manteau avec partie profonde enrichie en grenat, olivine, pyroxène et partie superficielle correspondant à un liquide résiduel de composition différente.



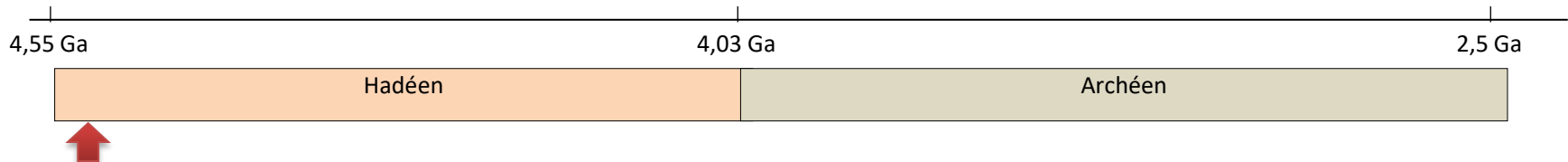
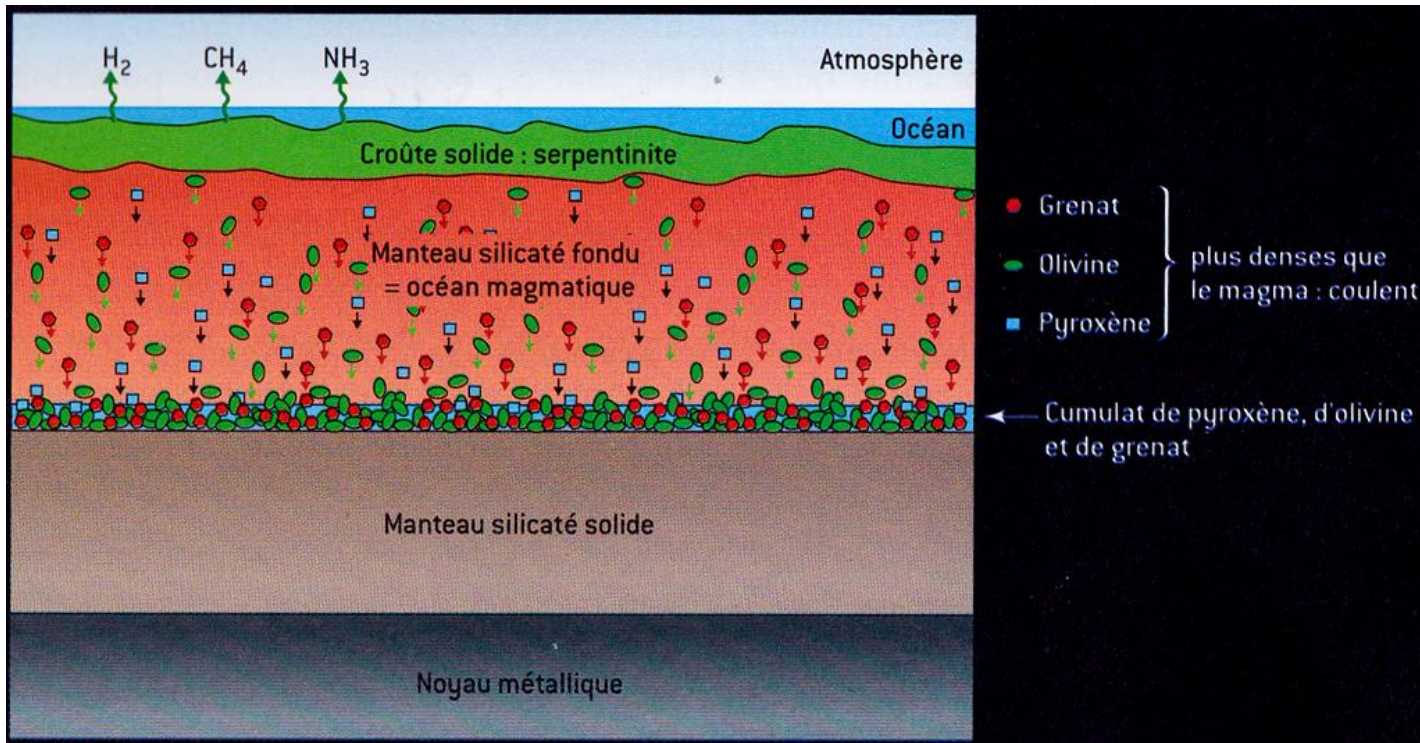
Sur Terre: Mécanisme de fractionnement au sein de l'océan magmatique

Après accumulation du grenat, olivine et pyroxène au fond de l'océan magmatique, la surface se refroidit et se solidifie.



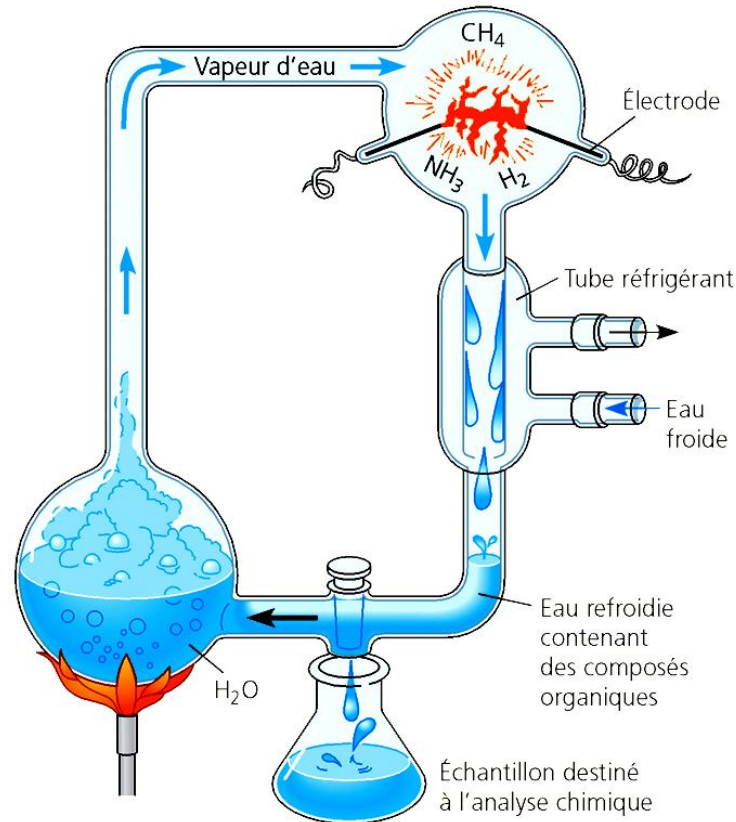
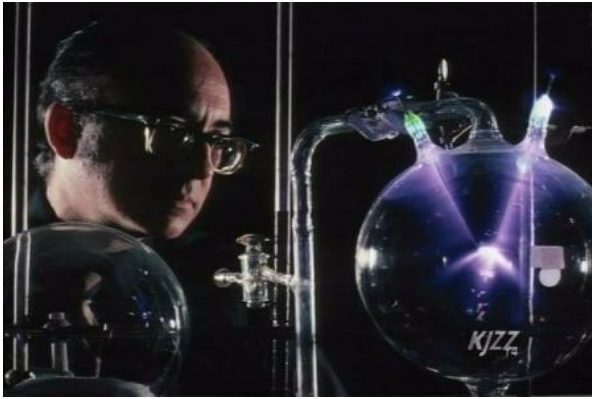
Sur Terre: Mécanisme de fractionnement au sein de l'océan magmatique

Au contact de l'eau (déjà présente, sous forme liquide ou vapeur), les minéraux s'altèrent en minéraux hydratés (serpentinisation). Ces réactions ont pu libérer du H_2 qui a pu se combiner avec le CO_2 et le N_2 de l'atmosphère primitive pour former CH_4 et NH_3 .

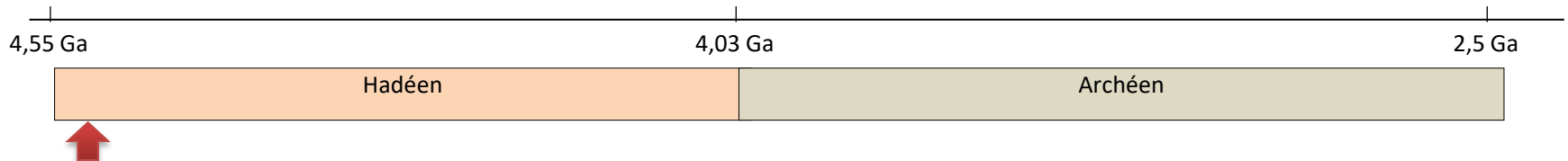


Conséquence du fractionnement des silicates au sein de l'océan magmatique

Ainsi l'atmosphère est bien réductrice... CH_4 et NH_3 peuvent se recombinaer avec l' H_2O et H_2 pour former des acides aminés (expérience de Miller, 1953!)



Mais d'où vient le CO_2 et N_2 ???



Au sein de l'océan magmatique, une extraction des éléments volatils aurait fait évoluer la composition de l'atmosphère.

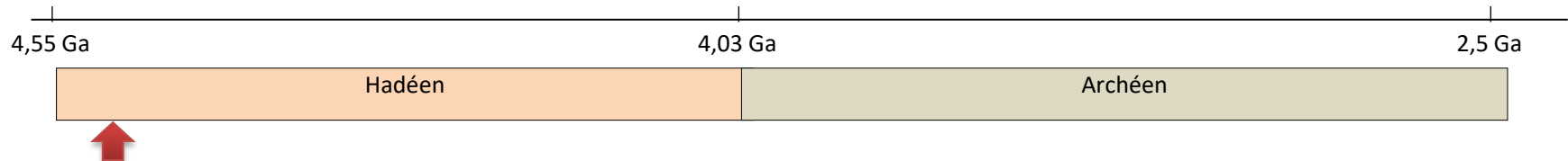


Les arguments:

- Les volcans actuels libèrent H_2O , CO_2 , CO , H_2S , H_2 , SO_2 , N_2 ...

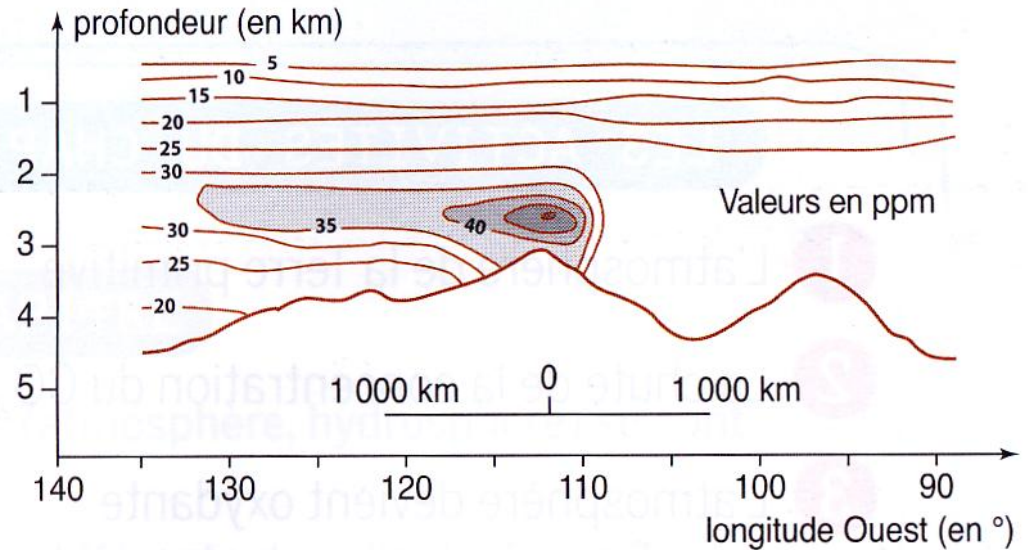


Fernandina, Galapagos

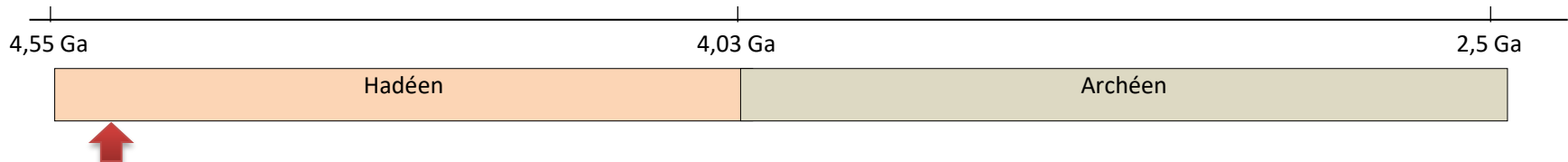


Les arguments:

- A l'aplomb des dorsales (Islande), le rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ est 8 fois supérieur à celui de l'atmosphère → Cet excès de ^3He proviendrait du dégazage des magmas qui se mettent en place à cet endroit (confirmé aussi par des rapports $^{20}\text{Ne} / ^{22}\text{Ne}$, plus élevé au niveau des dorsales)



Teneur en hélium de l'eau de mer au-dessus de la dorsale Pacifique
(la teneur en hélium de l'atmosphère est de 5 ppm environ).





Les arguments:

-Utilisation des isotopes ^{129}Xe (Xénon) et ^{129}I (iode):

^{129}I , formé dans la nébuleuse protosolaire, a été piégé dans le manteau au cours de l'accrétion.

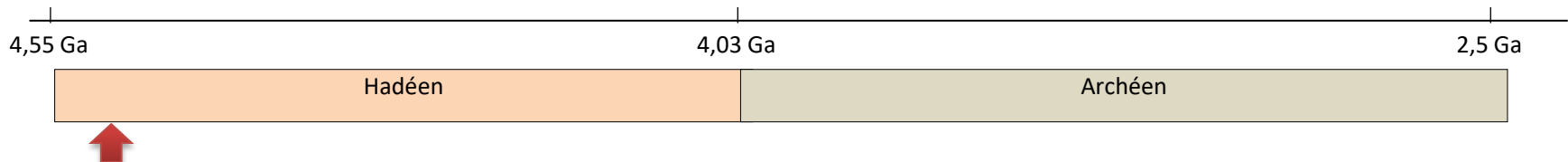
Dans le manteau, on a la réaction de désintégration: $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$

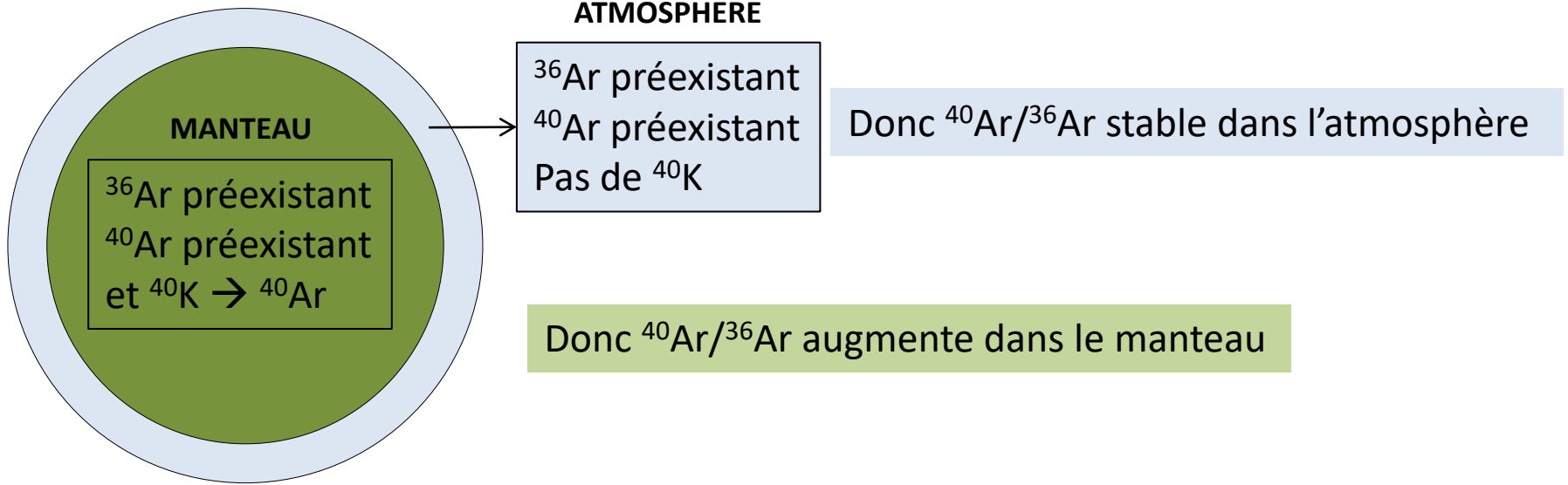
La demi vie de ^{129}I est très courte (17 MA)

^{129}Xe est rare dans l'atmosphère, alors qu'il est abondant dans les basaltes des dorsales océaniques

Si l'atmosphère est pauvre en ^{129}Xe , c'est que l'extraction des éléments volatils du manteau s'est faite précocement, avant que la totalité de l'iode ^{129}I se soit désintégré en ^{129}Xe (sinon, l'atmosphère aurait été enrichie en ^{129}Xe)

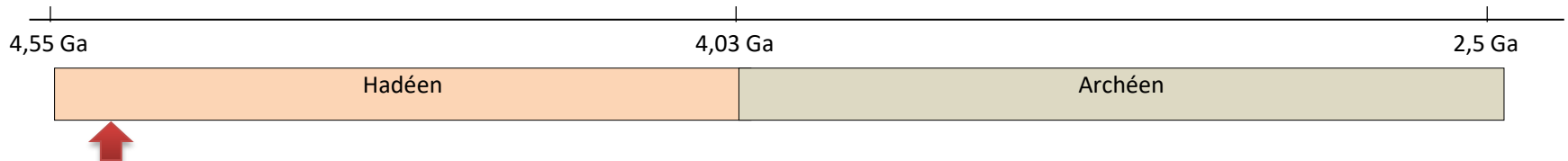
→ On suppose que le dégazage du manteau a été précoce (probablement au cours des 200 premiers MA d'existence de la Terre)



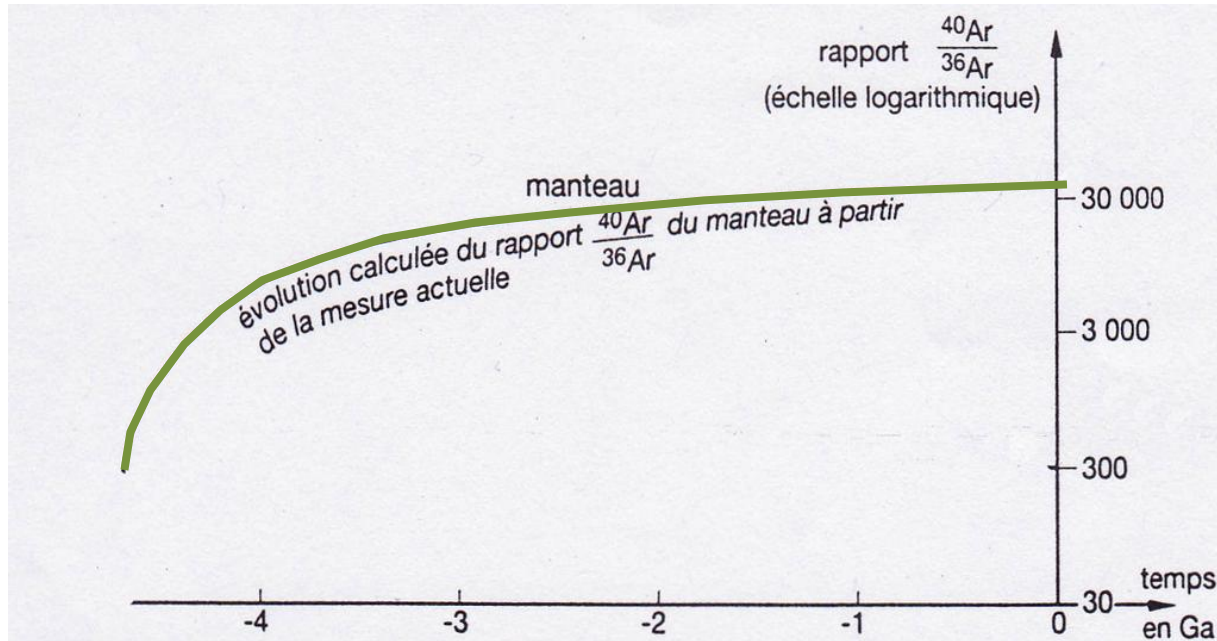
Les arguments: -Utilisation des isotopes ^{40}Ar et ^{36}Ar (Argon):

Le manteau terrestre et l'atmosphère contiennent deux isotopes de l'Argon (^{40}Ar et ^{36}Ar). Dans le manteau, une partie de ^{40}Ar provient de la désintégration de ^{40}K . On peut donc dire que depuis sa formation, le manteau terrestre s'enrichit en ^{40}Ar .

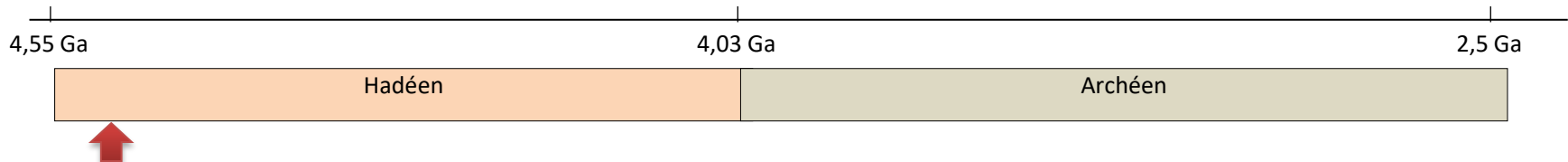
En revanche, l'atmosphère ne contenant pas de ^{40}K , la teneur en ^{40}Ar est resté stable, ainsi que le rapport $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$.

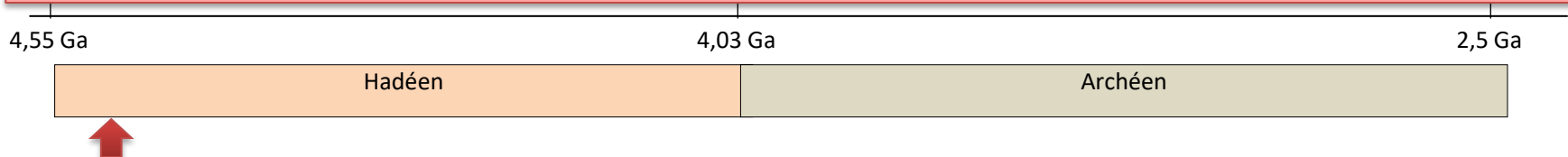


Les arguments: -Utilisation des isotopes ^{40}Ar et ^{36}Ar (Argon):



L'analyse des gaz contenus dans les basaltes ou les péridotites donne un rapport $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ voisin de 30 000. La réaction $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ obéissant à une loi exponentielle, on peut construire une courbe théorique de l'évolution du rapport $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ depuis la formation de la Terre.



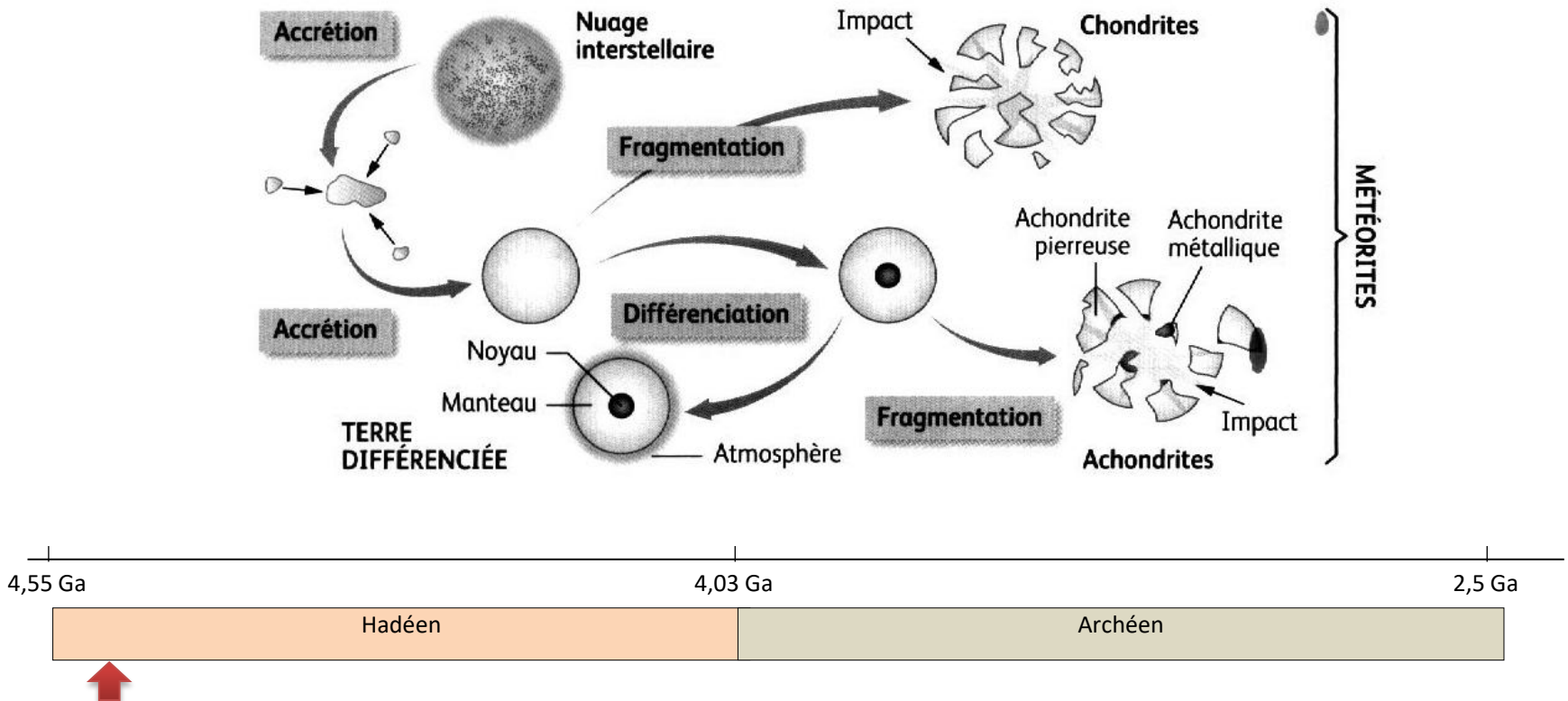


Les arguments:

- Les chondrites:

Ce sont des météorites qualifiées d'indifférenciées: elles proviennent d'astéroïdes de trop petite taille pour avoir subi une différenciation lors de leur formation.

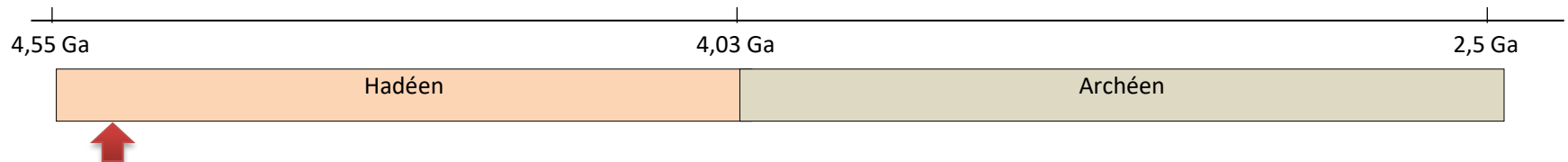
On pense donc qu'elles reflètent la composition originelle de la Terre primitive, ce qui permet indirectement d'avoir une idée des composés volatils produit au cours du dégazage.



A large, dark, irregularly shaped meteorite specimen resting on a green circular base. The surface is heavily textured with cracks and small white mineral inclusions.

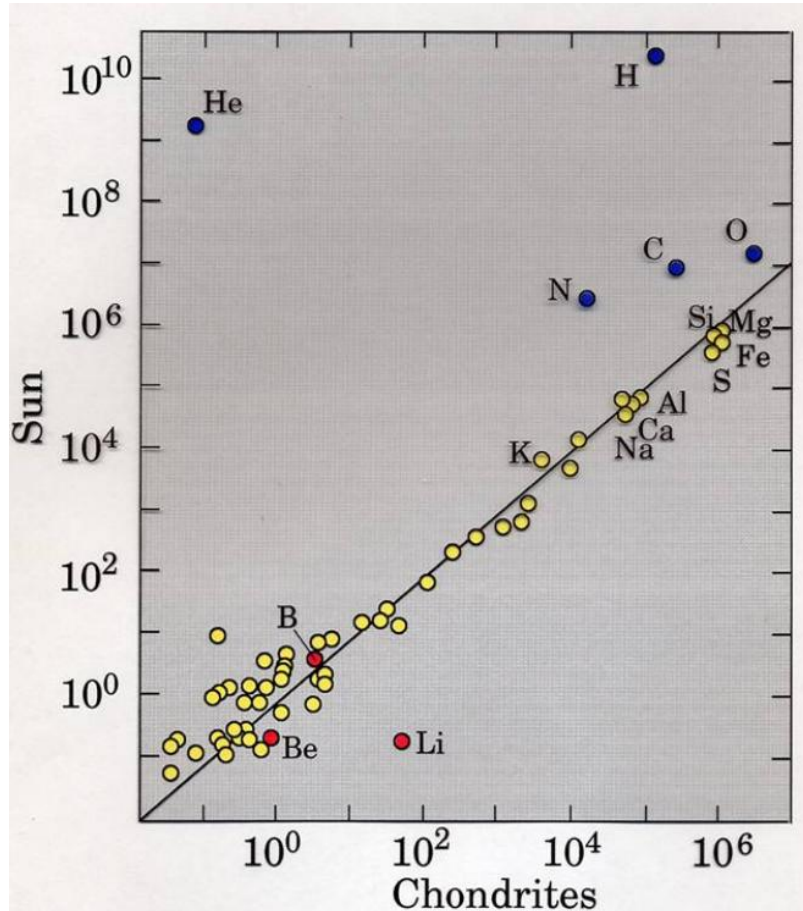
A photograph of a dark, irregularly shaped rock sample, likely a meteorite, with a 1 cm scale bar. The rock has a dark, granular texture with numerous small, light-colored inclusions. The scale bar is located at the top left of the image.

Source : J. H. Wittke & T. E. Bunch



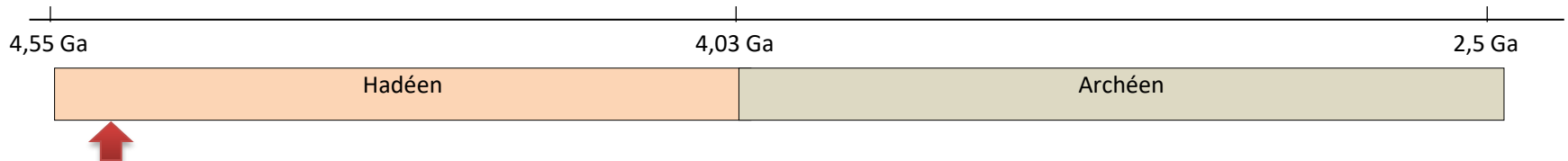
- Les chondrites carbonées

Comparaison entre la composition élémentaire des chondrites carbonées et celle du Soleil



Une excellente corrélation apparaît, sauf pour les éléments volatils (hydrogène, hélium, gaz rares, carbone ...) qui sont difficiles à piéger dans les silicates.

La composition des chondrites carbonées étant proche de la matière solaire (donc de la nébuleuse primitive), cela montre bien qu'elles sont indifférenciées.



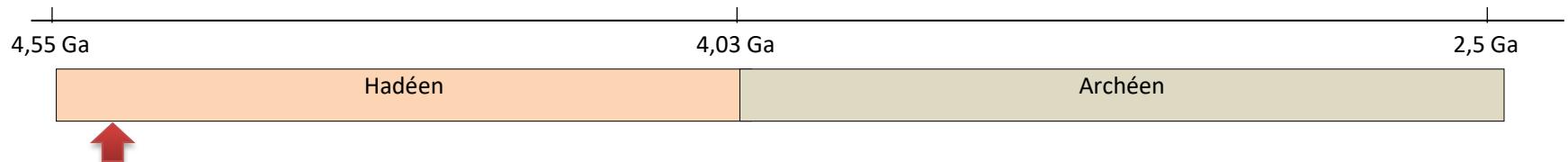
- Les chondrites à enstatite



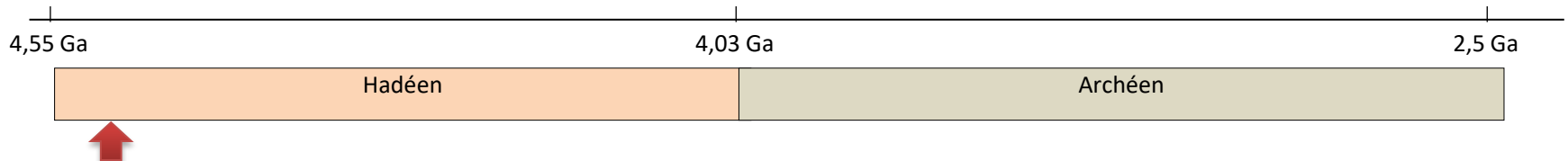
Chondrite EH4 Abee, 1952, Canada



NWA 974 – Remlia, Avril 2001, Maroc



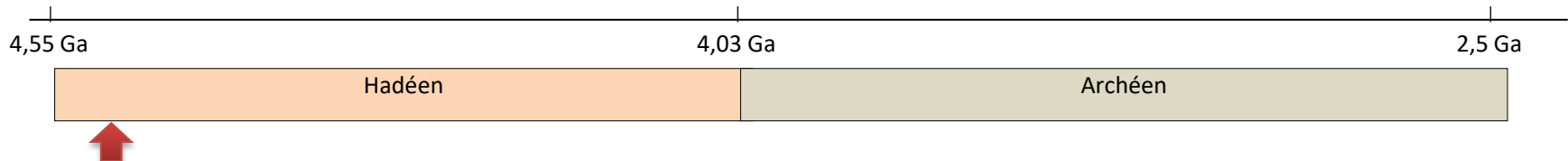
Quels sont les meilleurs candidats pour la formation de la Terre par accréation puis son dégazage: les chondrites carbonées ou les chondrites à enstatite ?



Quels sont les meilleurs candidats pour la formation de la Terre par accrétion puis son dégazage: les chondrites carbonées ou les chondrites à enstatite ?

Chondrites carbonées	Chondrites à enstatite
Teneur en Si, Al, Fe et Mg proche des roches terrestres Composition proche d'un manteau relativement oxydé, qui aurait donné par dégazage une atmosphère plutôt oxydante, riche en CO₂ et N₂ (mais sans O₂ évidemment) Possibilité d'un bombardement post-accrétion qui aurait ajouté à l'atmosphère réductrice des éléments volatils plus oxydés (N₂, CO₂, H₂O)	Composition isotopique en oxygène proche de celle des roches terrestres Composition proche d'un manteau relativement réduit, qui aurait donné par dégazage une atmosphère plutôt réductrice, riche en H₂, CH₄, H₂S, NH₄ (atmosphère prébiotique proche de celle imaginée par Miller)

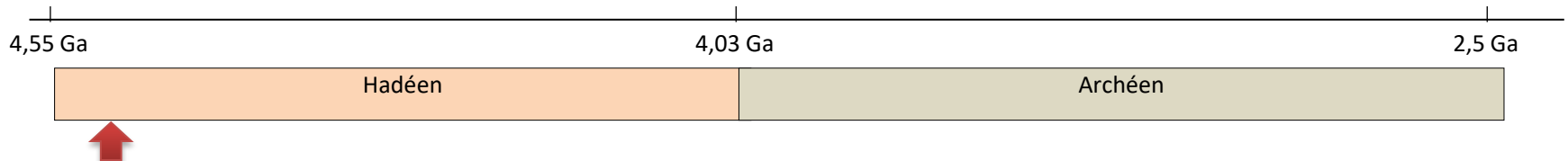
 Contribution possible de ces deux types de météorites pour l'accrétion puis le dégazage du manteau (les 2 hypothèses ne sont pas incompatibles !)



...et pour mettre tout le monde d'accord :

Comparaison de la chimie des chondrites (moyenne de différents types) avec celle de la Terre globale (moyenne de toutes les enveloppes)

Éléments	% dans les chondrites	% dans la Terre
O	31%	32.4%
Fe	27.4%	28.2%
Si	18.5%	17.2%
Mg	14%	15.9%
Ca	3.5%	1.6%
Al	2%	1.5%
Na	0.6%	1.25%
K	0.4%	0.02%
Autres éléments	2.6%	2.9%



Les scientifiques supposent que l'intense bombardement météoritique après la formation de la Terre aurait pu apporter des éléments volatils et modifier ainsi la composition de l'atmosphère.

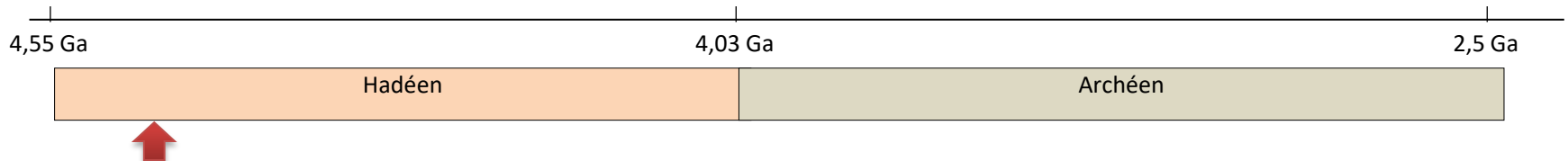
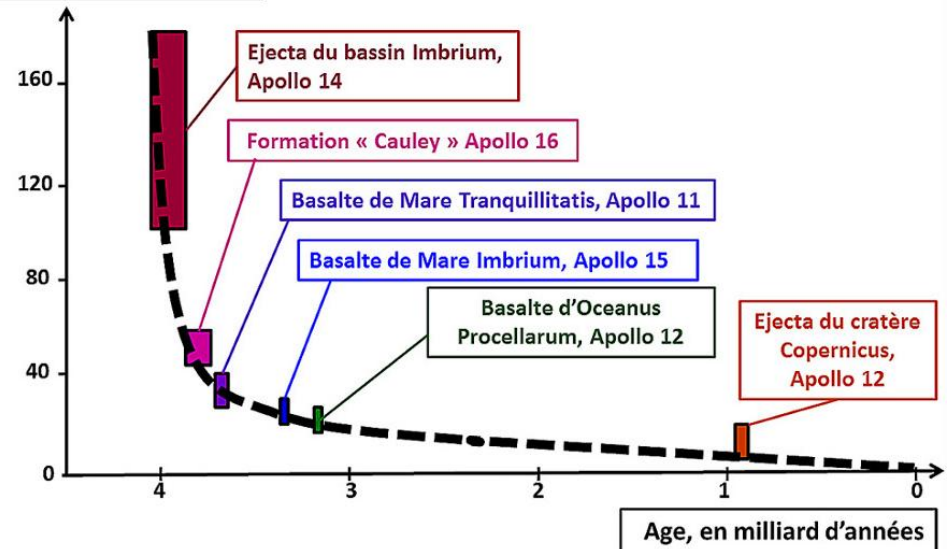


Les arguments:

- La datation des basaltes lunaires au niveau des cratères d'impacts ont permis de dater ce bombardement. Il a été intense à l'Hadéen.

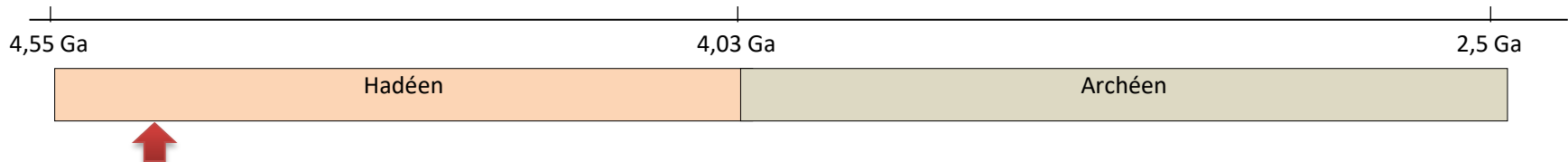


Densité de cratères = milliers de cratères de diamètre > 500 m par million de km²



Les arguments:

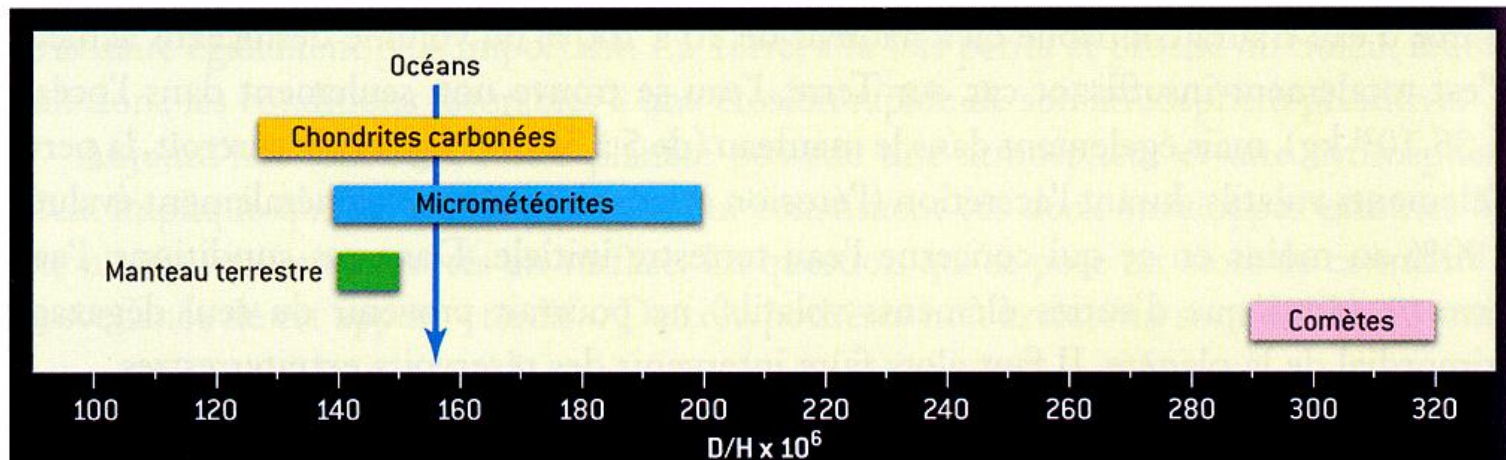
- Une estimation du stock d'eau dans les différents compartiments (manteau, atmosphère) semble montrer que le stock d'eau actuel ne peut pas provenir du seul dégazage primordial de la planète



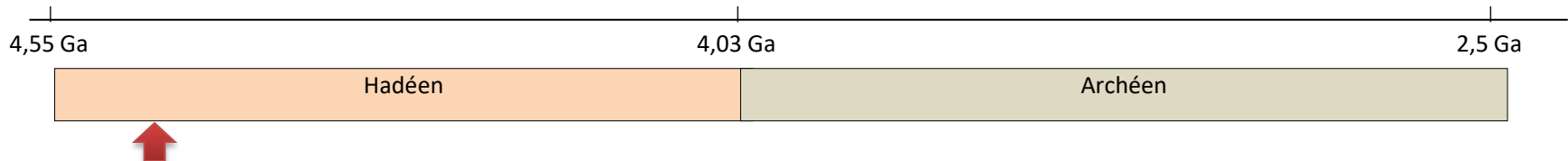


Les arguments:

- On a mesuré le rapport deutérium / hydrogène (D/H) de l'océan et de différents réservoirs.

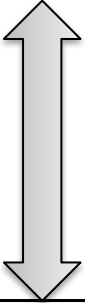


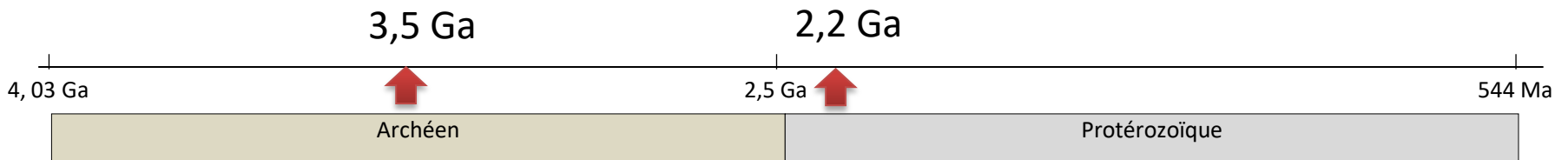
→ La comparaison des rapports suggère une filiation entre l'eau des océans et celle des chondrites carbonées. On voit que les comètes n'ont probablement pas contribué à l'apport d'eau sur la Terre primitive, alors que les chondrites carbonées et les micrométéorites, oui !



L'oxygénation de l'atmosphère

L'oxygénation de l'atmosphère

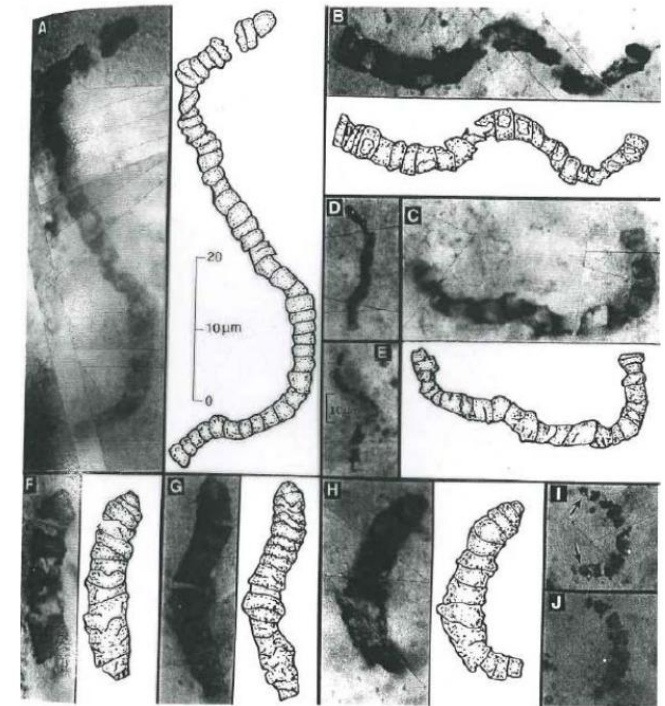
EVENEMENT	INDICES MARINS	INDICES CONTINENTAUX
-3,5 Ga : Production d'O ₂ par photosynthèse dans les océans	Fossiles de stromatolites	
	Banded Iron Formations (BIF)	
 Comment expliquer l'apparition retardée d'O₂ dans l'atmosphère ?		- Conglomérat à galets de pyrite (Fer réduit, FeS ₂) du
		Uraninite (Uranium réduit) dans des paléosols
2,2 Ga : Apparition de l'O ₂ dans l'atmosphère		Red beds (paléosols riches en hématite Fe ₂ O ₃)
		Disparition des minéraux réduits (Uraninite)



Stromatolites archéens, région du Pilbara (Nord-Ouest australien): - 3,43 Ga

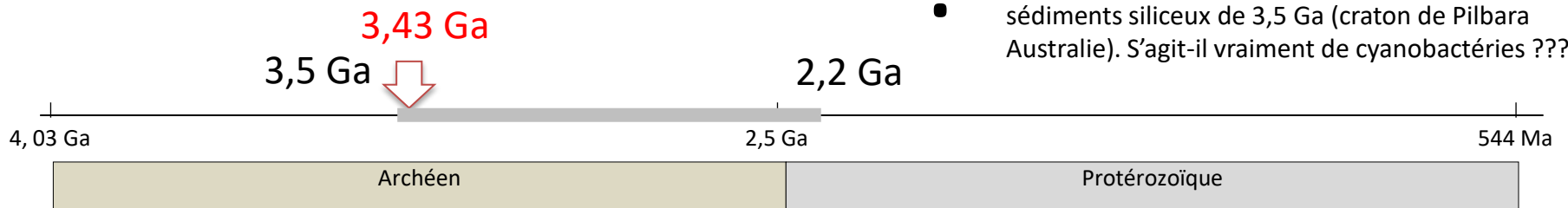


<http://www.falw.vu/~smit/hamersley/hamersleypicts/stromatolites.jpg>



?

Photographie de lames minces taillées dans des sédiments siliceux de 3,5 Ga (craton de Pilbara Australie). S'agit-il vraiment de cyanobactéries ???





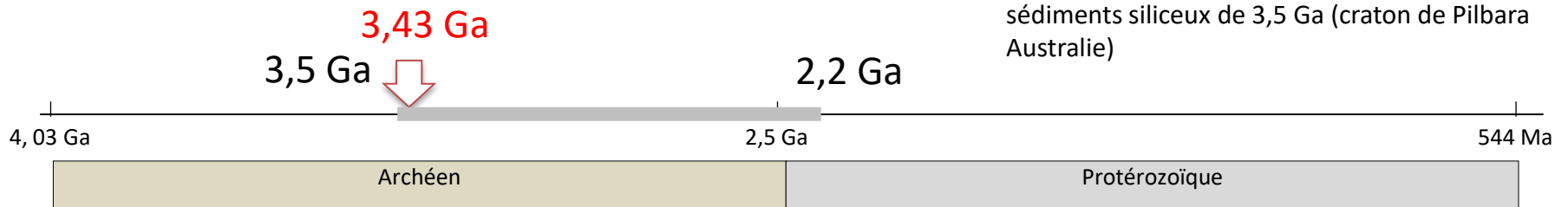
Polémique : Cette interprétation est controversée ! Ces « stromatolites » fossiles pourraient être le fruit de processus abiotiques ! Ces structures de type laminaire seraient le résultat d'une précipitation de carbonates suivies de déformations...



<http://www.falw.vu/~smit/hamersley/hamersleypicts/stromatolites.jpg>



Photographie de lames minces taillées dans des sédiments siliceux de 3,5 Ga (craton de Pilbara Australie)

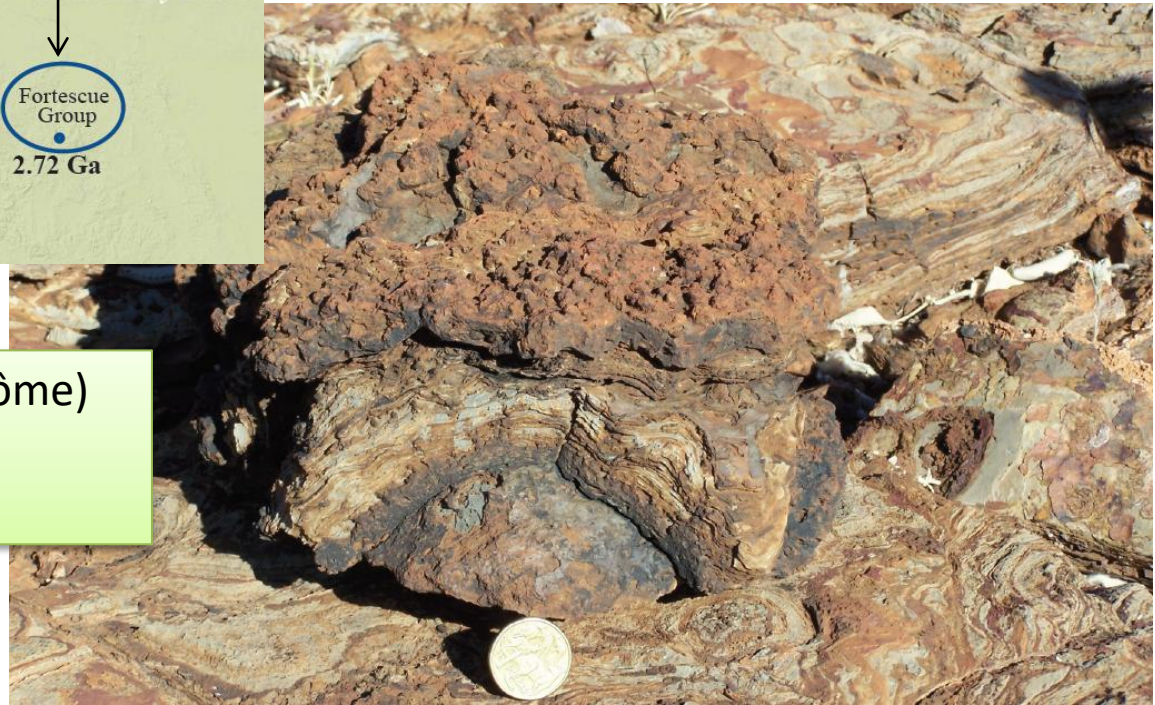
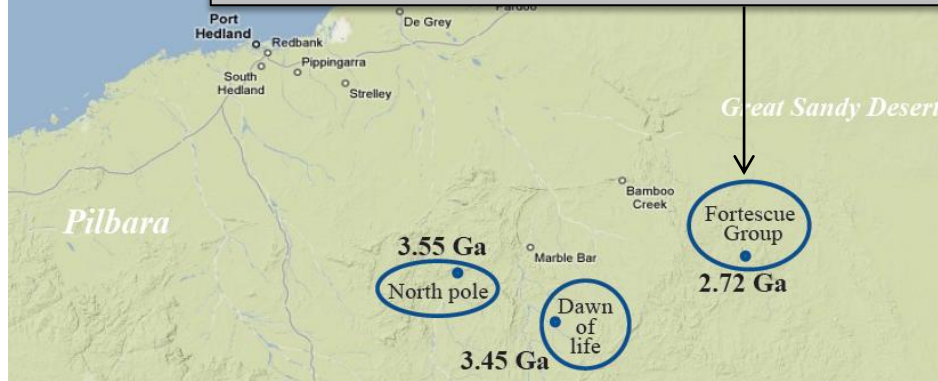


L'oxygénation de l'atmosphère

Stromatolites archéens, région de Fortescue (Nord-Ouest australien): - 2,7 Ga

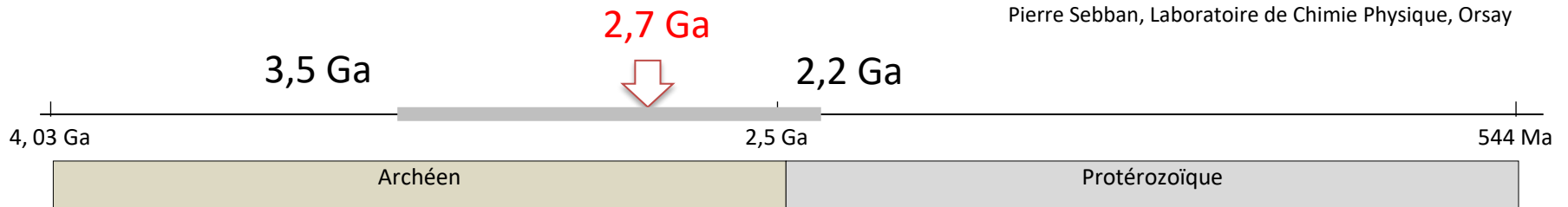


Là, Il s'agit bien de vrais stromatolites !!!



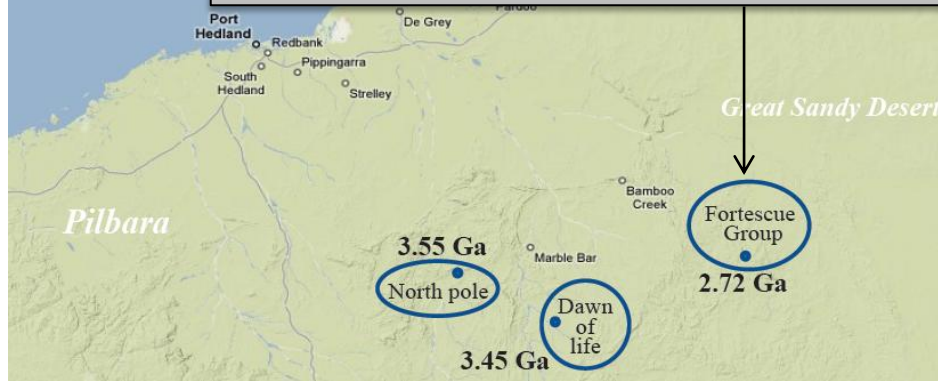
Leur morphologie (en forme de dôme)
est tout à fait comparable aux
stromatolites actuels

Pierre Sebban, Laboratoire de Chimie Physique, Orsay





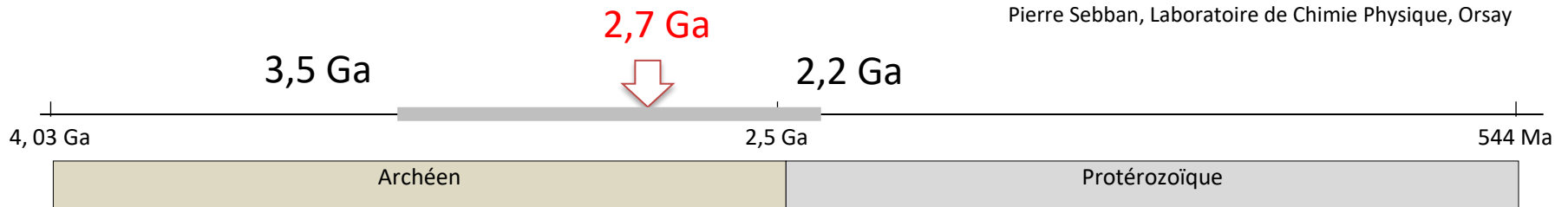
Là, Il s'agit bien de vrais stromatolites !!!



Des analyses des microstructures de ces roches laissent apparaître des formations de «globules organiques» associés à des microcristaux de carbonate de calcium, identiques aux stromatolites récents (Lepot et coll. (2008) Nature Geosciences).



Pierre Sebban, Laboratoire de Chimie Physique, Orsay



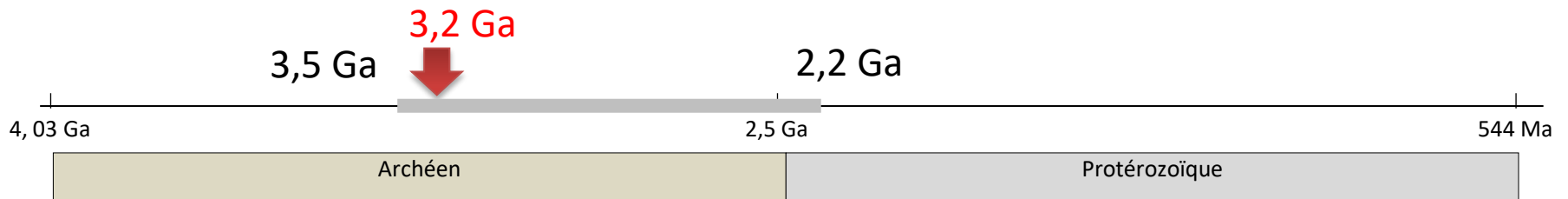


L'oxygénation de l'atmosphère

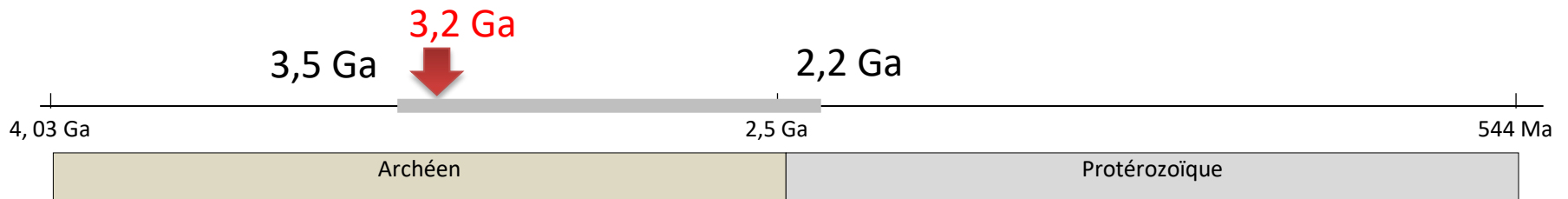
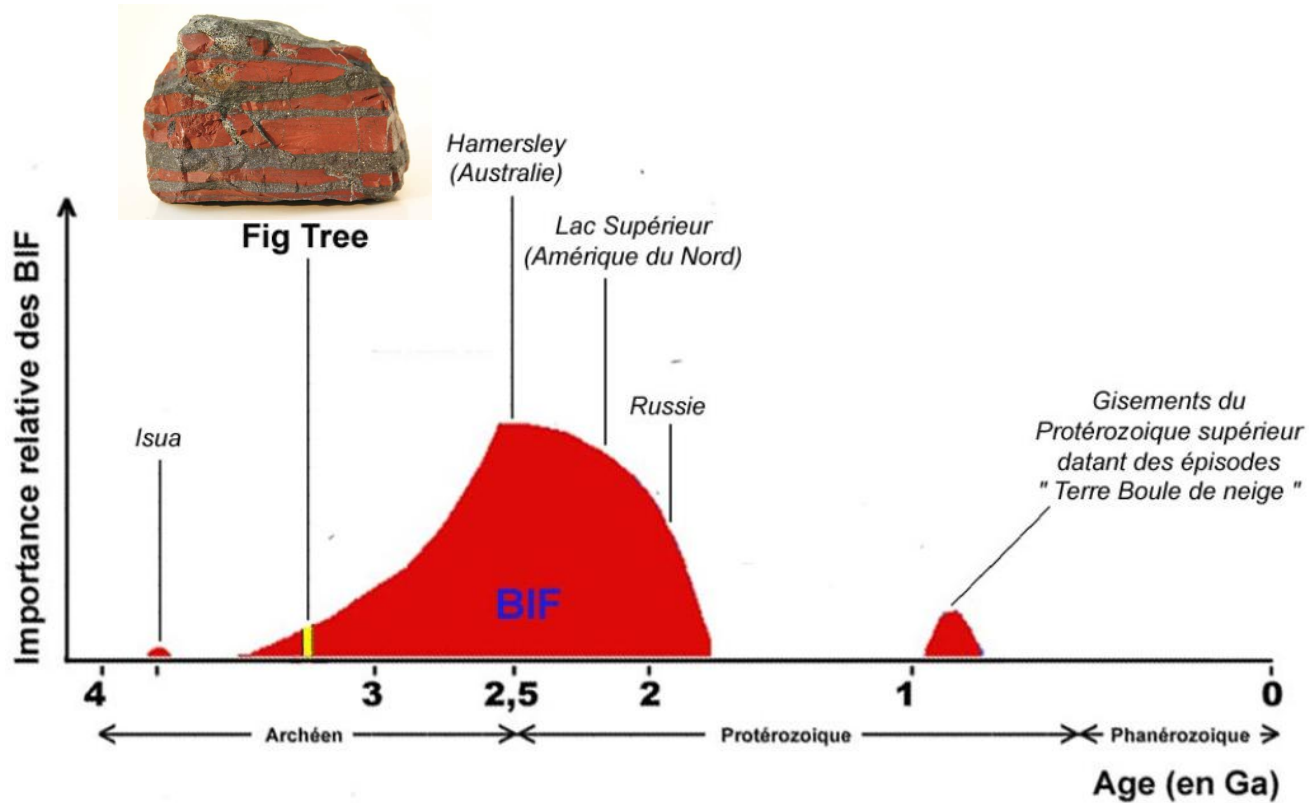
Fers rubannés ou Banded Iron Formation (BIF) de Barberton (Afrique du Sud) – Série de Fig Tree, -3,26 à -3,22 Ga

Ce sont toujours des formations marines, présentant une alternance de lits d'hématite gris ou bruns-rouges foncés, et de lits de silice roses ou rouges.

Hématite = Fe_2O_3 , oxyde ferrique (fer sous sa forme la plus oxydée Fe^{3+})



Fers rubannés ou Banded Iron Formation (BIF) de Barberton (Afrique du Sud) – Série de Fig Tree, -3,26 à -3,22 Ga



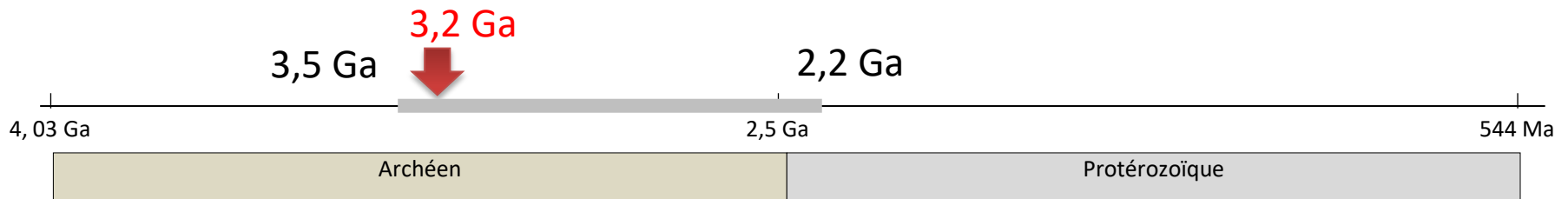
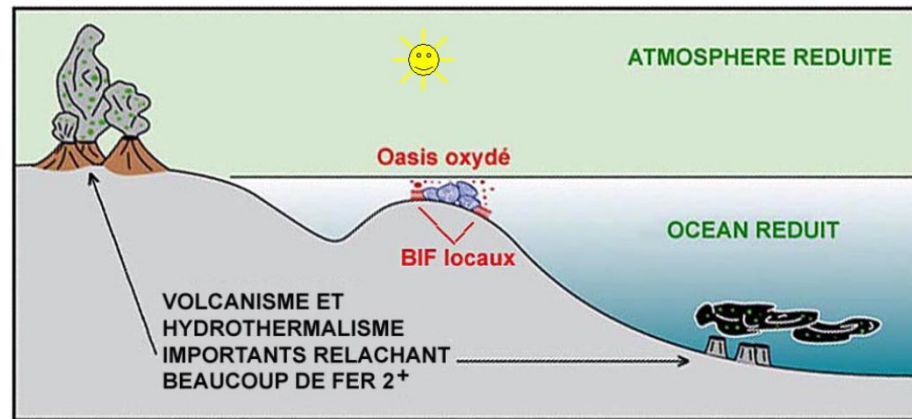
Fers rubannés ou Banded Iron Formation (BIF) de Barberton (Afrique du Sud) – Série de Fig Tree, -3,26 à -3,22 Ga

Pour expliquer l'origine de l'O₂ qui aurait entraîné l'oxydation des ions Fe²⁺ pour former ces oxydes:

-HYPOTHESE 1 : Une photolyse de l'eau par les UV solaires dégageant de l'O₂, rendant de ce fait la mer oxydante.

Peu probable car le soleil de l'époque était moins actif et de plus, les BIFS traduisent des oxydations localisées, et non pas généralisées.

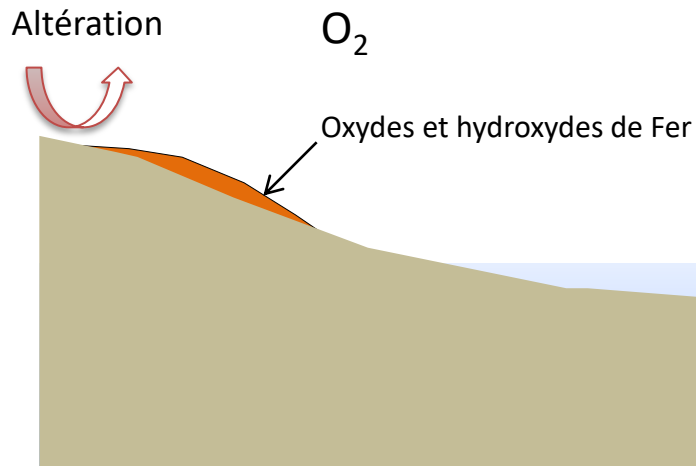
- HYPOTHESE 2 : Des « oasis » de vie photosynthétique localisés, comme des tapis ou des amas de cyanobactéries.



Pour expliquer l'origine de Fe^{2+} pour former ces oxydes:

Fe^{2+} peut provenir du volcanisme et de l'activité hydrothermale mais aussi de l'altération et du lessivage des continents (exemple : biotite = $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH},\text{F})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$)

La mobilité du fer dépend de son état d'oxydation. Fe^{2+} (ferreux) est soluble dans l'eau et mobile. Par contre, la forme ferrique (Fe^{3+}), oxydée, n'est pas soluble.



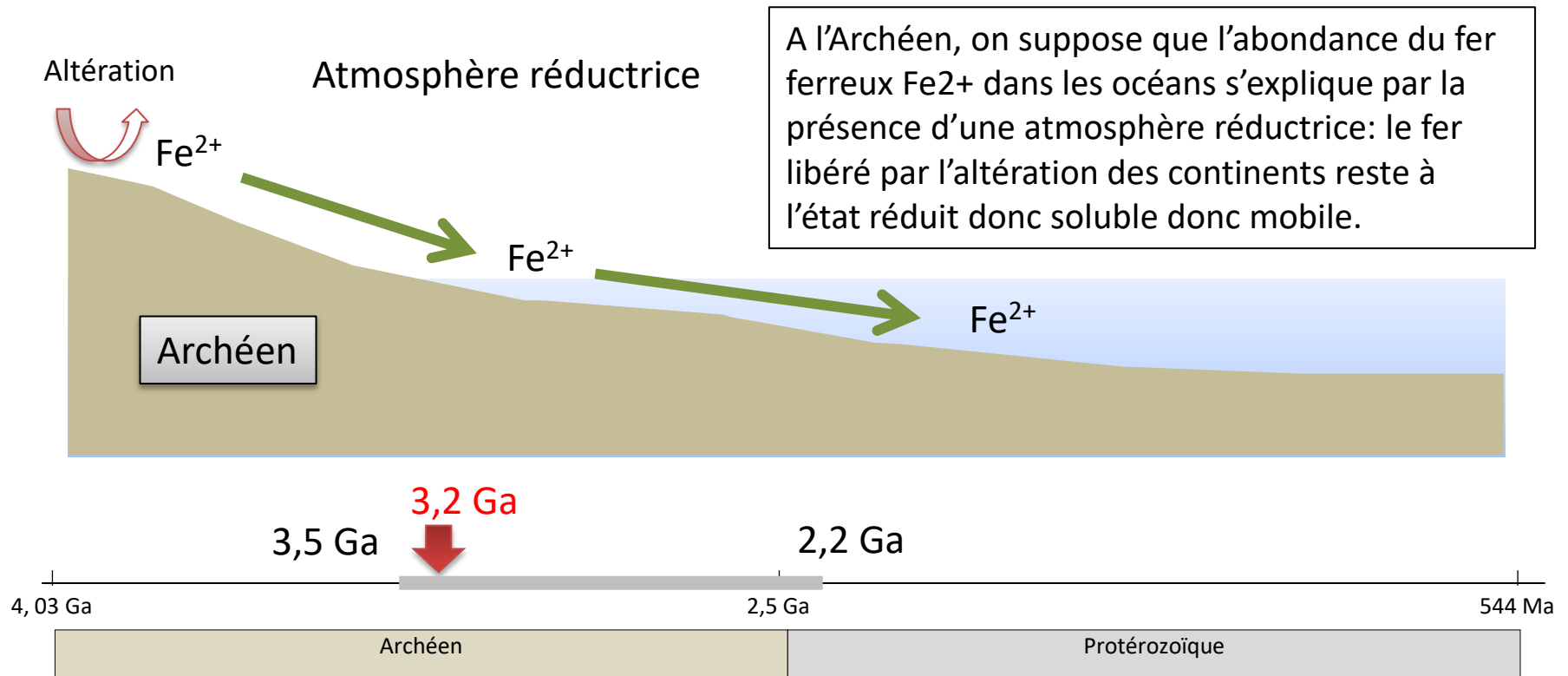
Actuellement, l'atmosphère est oxydante →
le fer libéré par l'altération des continents
est immobilisé sous forme d'oxydes et
hydroxydes → On en retrouve peu dans les
océans

Actuel

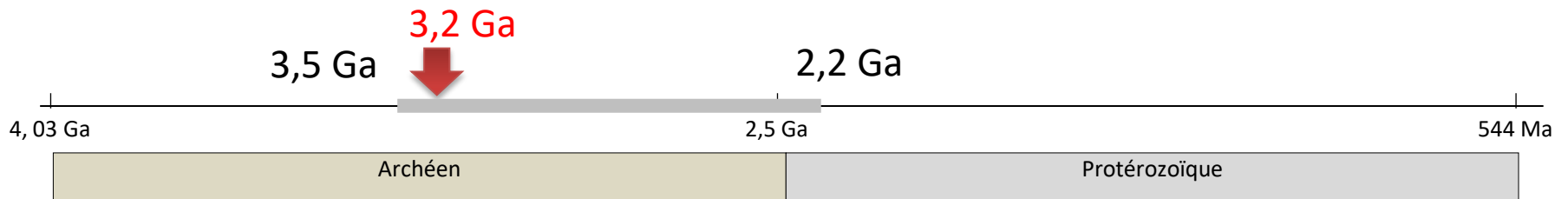
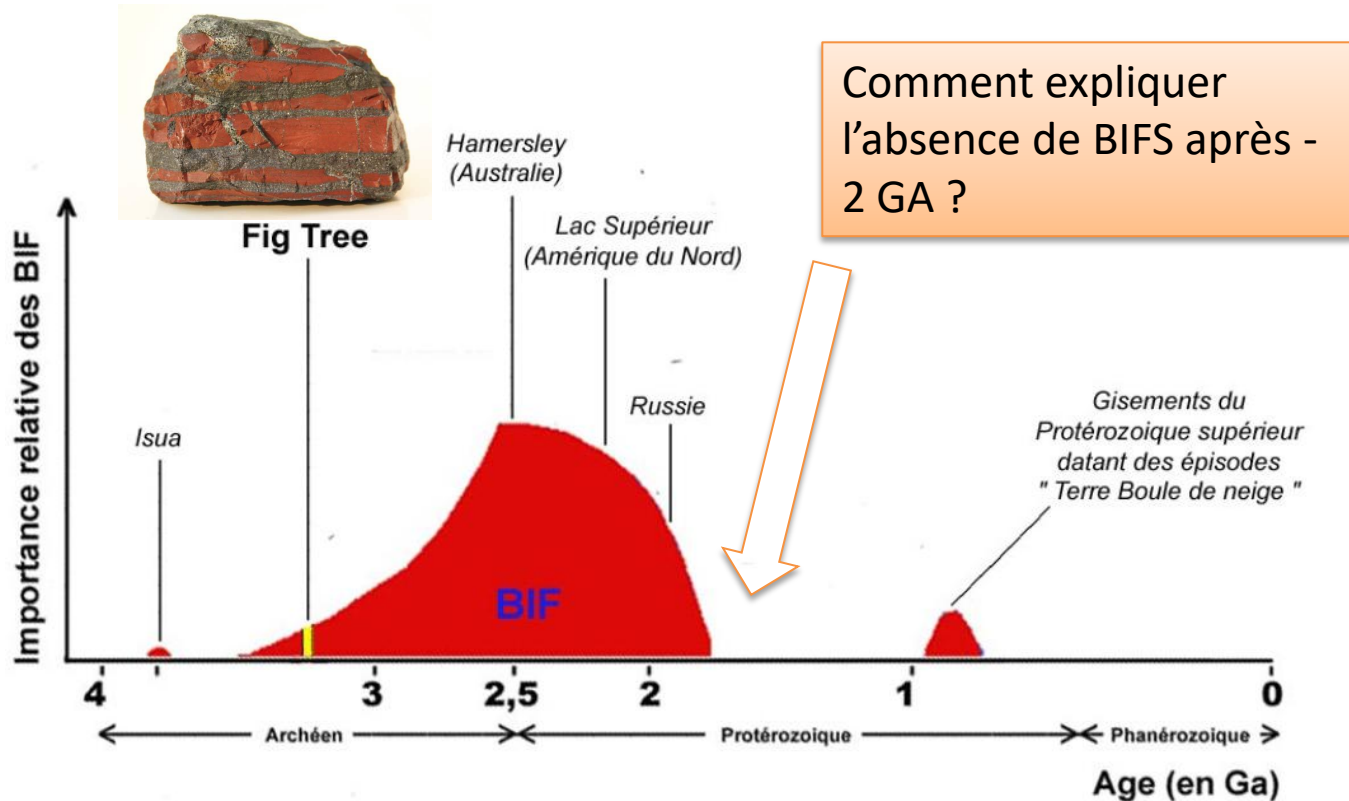
Pour expliquer l'origine de Fe^{2+} pour former ces oxydes:

Fe^{2+} peut provenir du volcanisme et de l'activité hydrothermale mais aussi de l'altération et du lessivage des continents (exemple : biotite = $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH},\text{F})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$)

La mobilité du fer dépend de son état d'oxydation. Fe^{2+} (ferreux) est soluble dans l'eau et mobile. Par contre, la forme ferrique (Fe^{3+}), oxydée, n'est pas soluble.



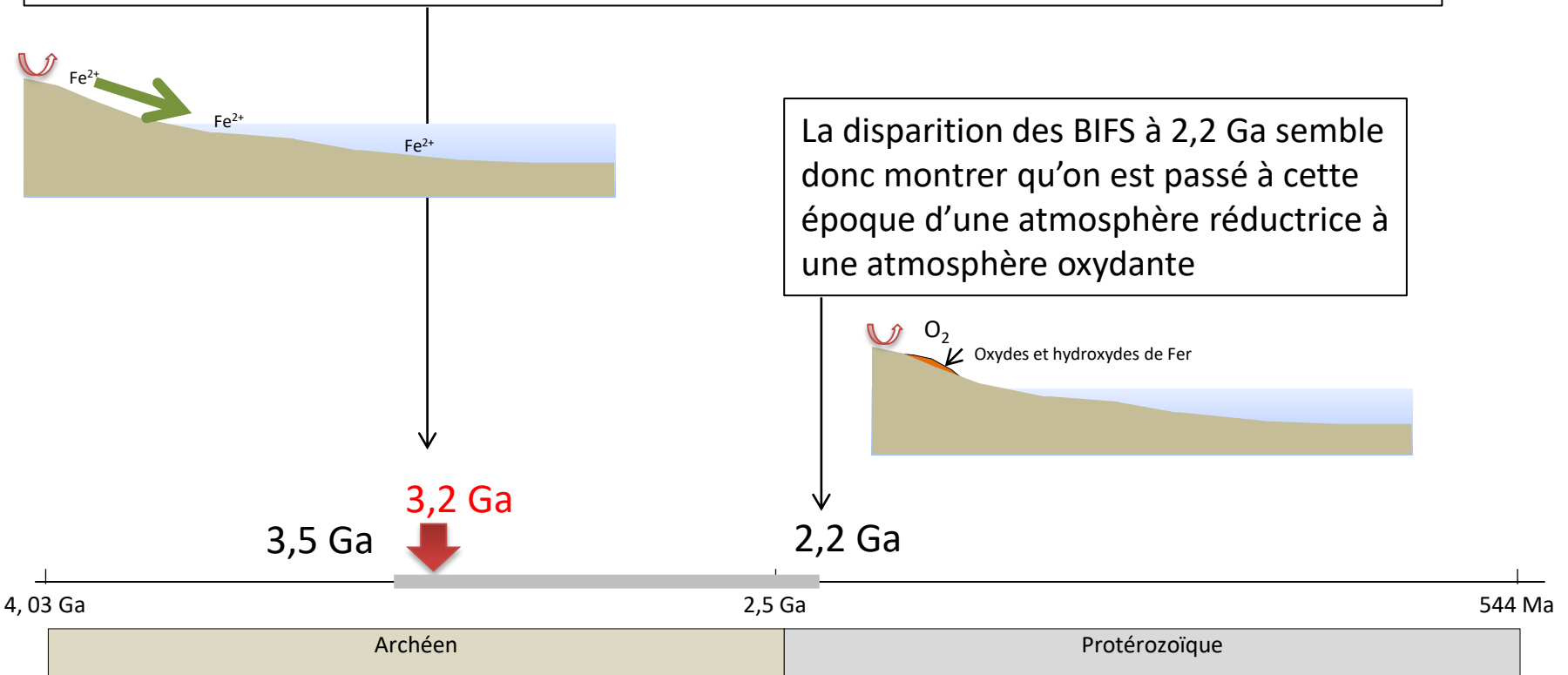
Fers rubannés ou Banded Iron Formation (BIF) de Barberton (Afrique du Sud) – Série de Fig Tree, -3,26 à -3,22 Ga



Pour expliquer l'origine de Fe^{2+} pour former ces oxydes:

Ainsi, la présence des BIFS montre que:

- Une partie du fer dissout des océans pouvait précipiter en présence d' O_2 (probablement d'origine biologique)
- Mais l'atmosphère était toujours réductrice



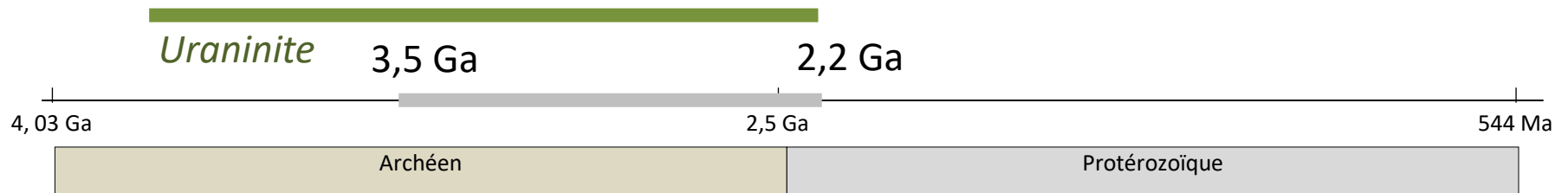
L'Uraninite (UO_2) est la forme réduite de l'uranium (la forme UO_3 est la forme oxydée, soluble dans l'eau).

La présence d'uraninite dans un milieu indique donc l'absence de dioxygène dans le milieu en question.

L'Uraninite ne se trouve que dans des sédiments d'âge plus ancien que -2,2 Ga



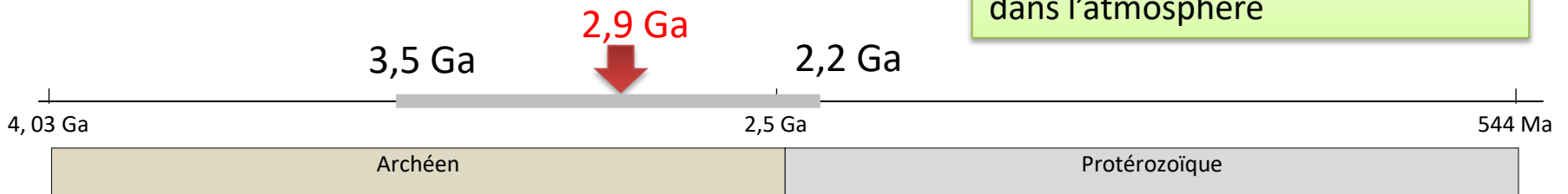
Cristal d'uraninite



Conglomérat à galets de pyrite (Fer réduit, FeS_2) du Witwatersrand, en Afrique du Sud (-2,9 Ga)



Formation détritique contenant du fer à l'état réduit → Absence d' O_2 dans l'atmosphère



La présence de couches rouges continentales (riches en oxydes de fer) est le signe de l'apparition de l' O_2 dans l'atmosphère

Palo Duro Canyon, Texas



3,5 Ga

2,2 Ga

Red Beds

4,03 Ga

2,5 Ga

544 Ma

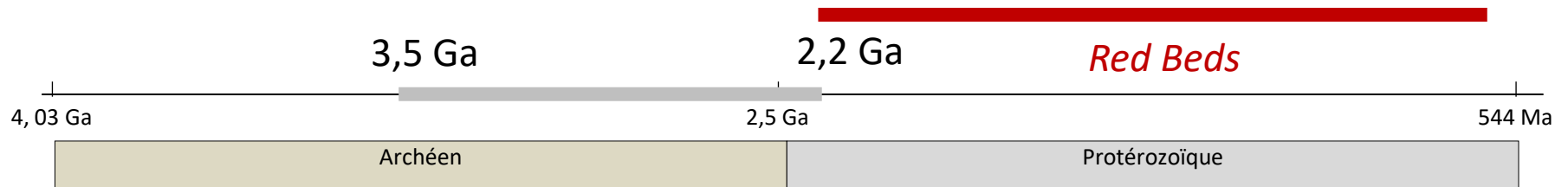
Archéen

Protérozoïque

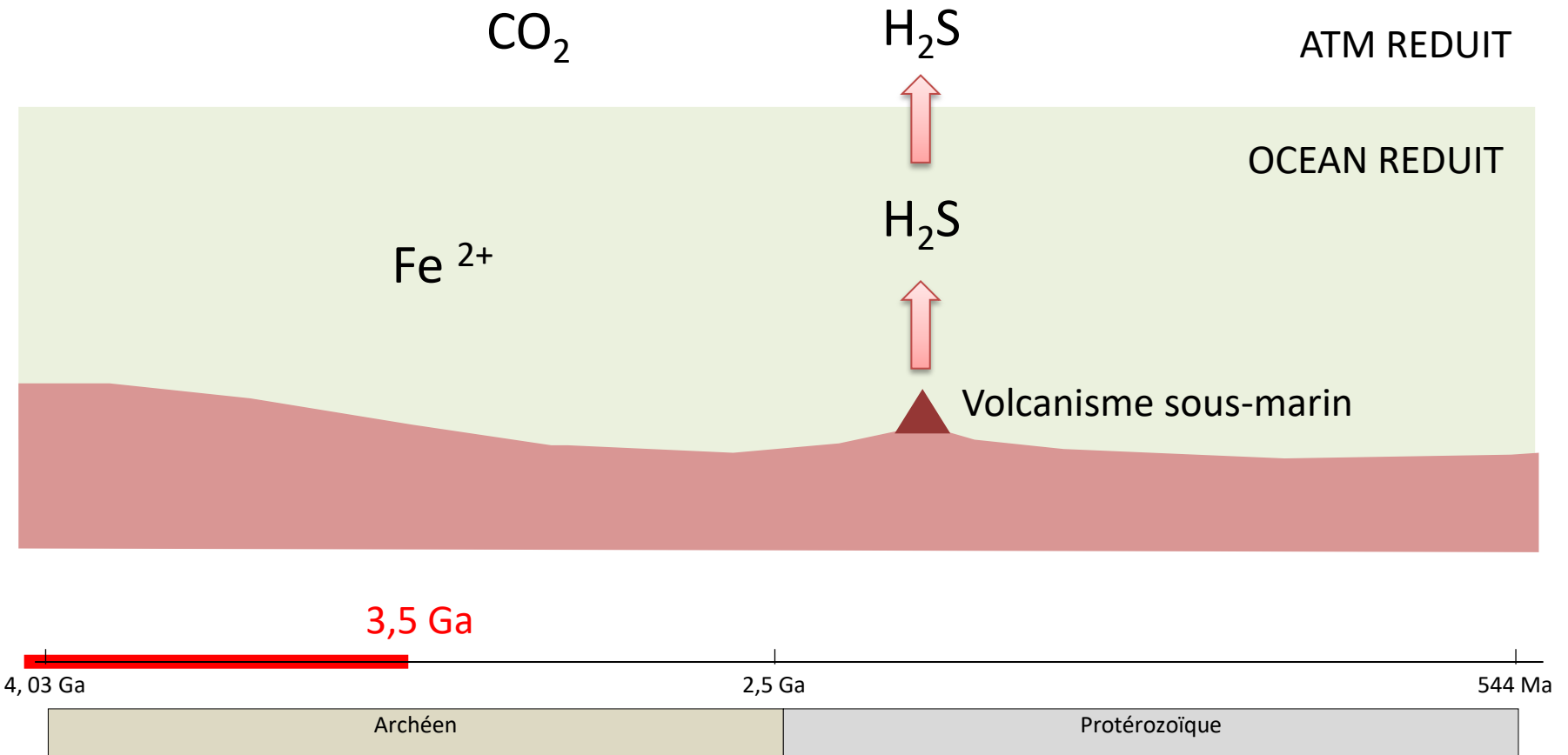
L'oxygénation de l'atmosphère

Red beds (paléosols riches en hématite Fe_2O_3)

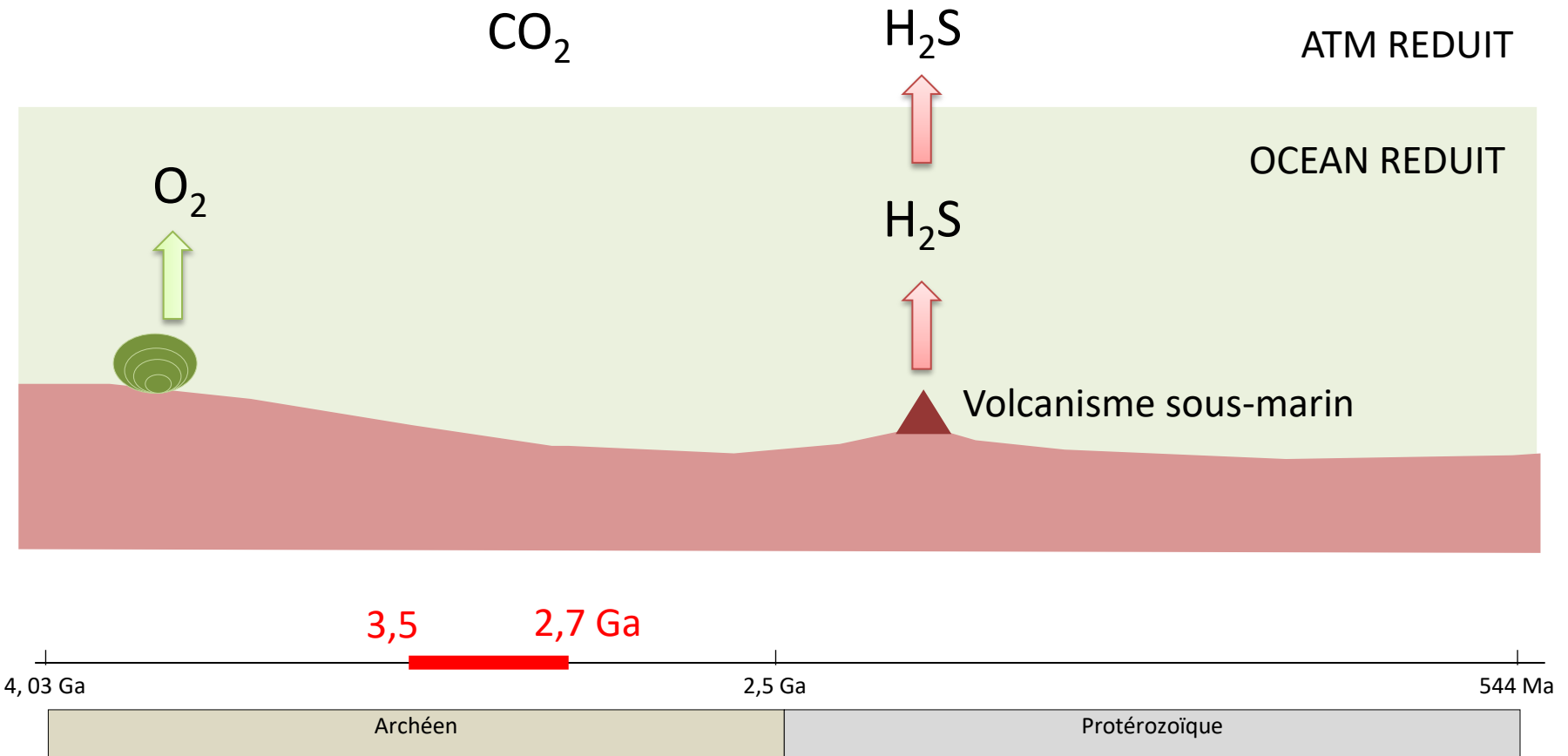
Sedona, Arizona



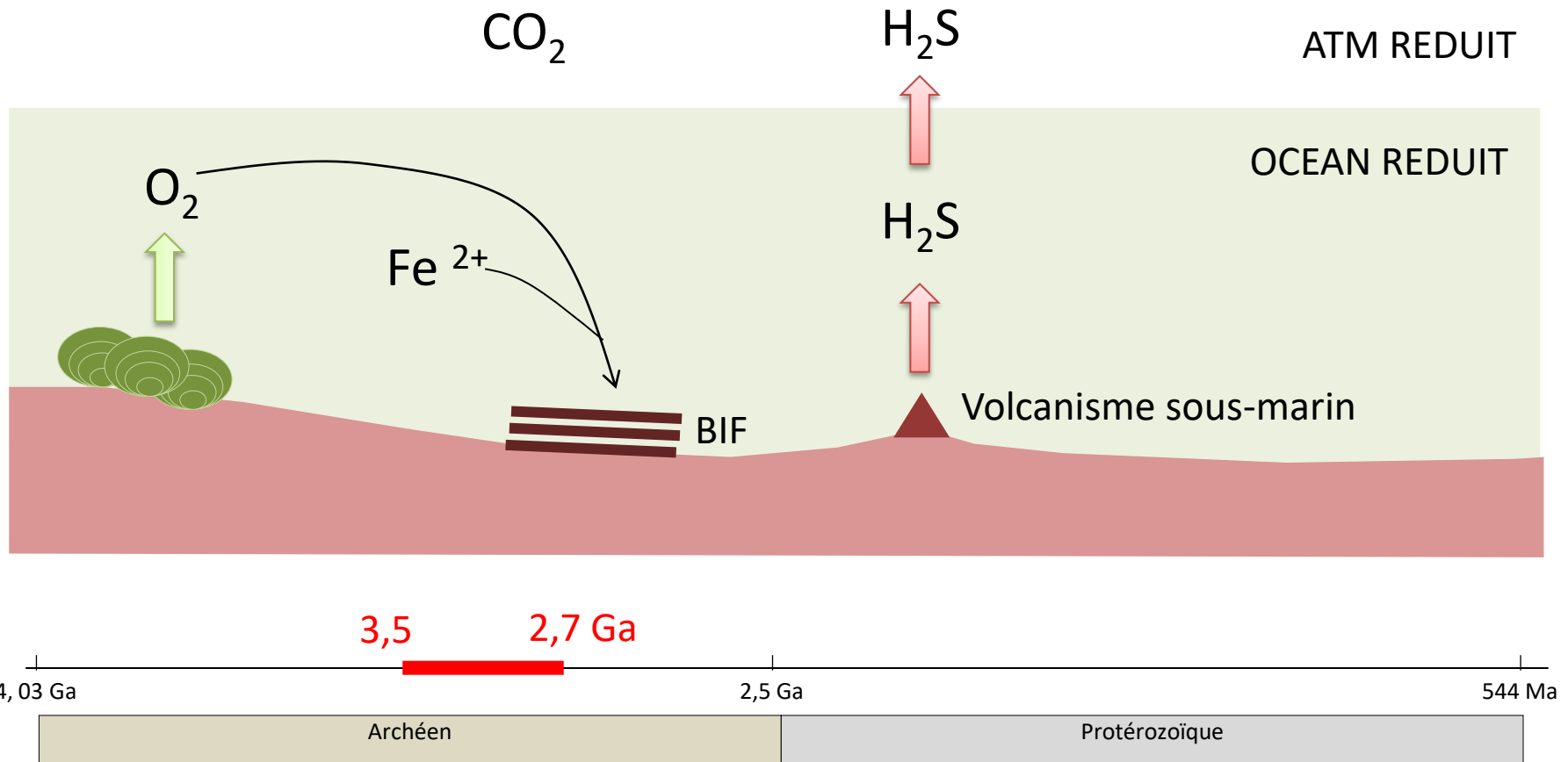
- Volcanisme sous marin produisant surtout du CO_2 et du soufre à l'état réduit (H_2S)
- Le fer reste à l'état réduit, dissous dans l'eau de mer.
- La présence de minéraux réduits (uraninite) dans les paléosols confirme l'absence d' O_2 dans l'atmosphère



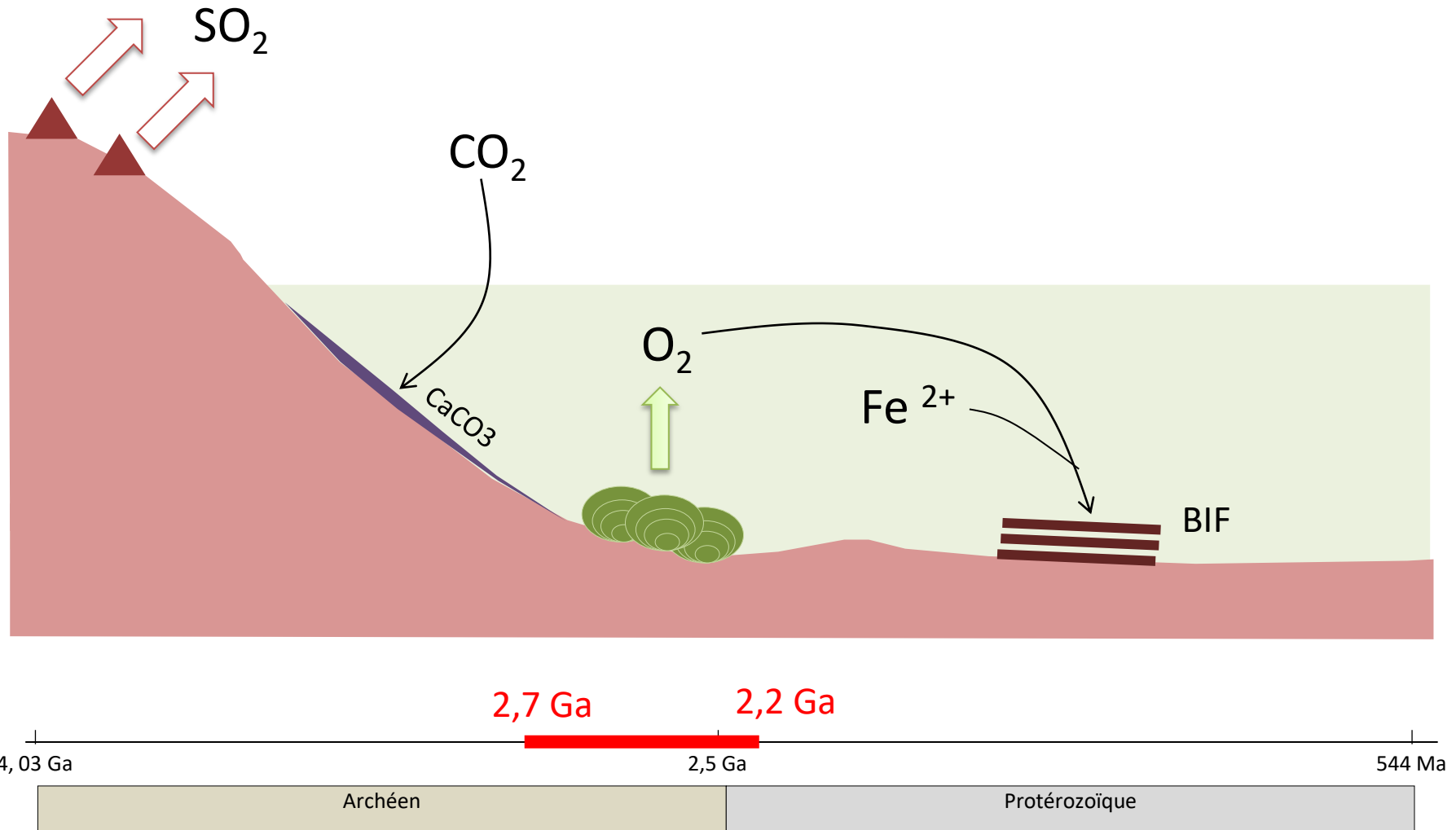
- 3,5 Ga : Apparition de la photosynthèse chez les cyanobactéries (premiers stromatolites) → production d'O₂
- L'océan reste globalement réduit car l'O₂ est piégé par le fer et sert à oxyder la matière organique
- Le fer précipite sous forme FeO₃ → BIF (Banded Iron Formations), sédiments alternativement réduits et oxydés



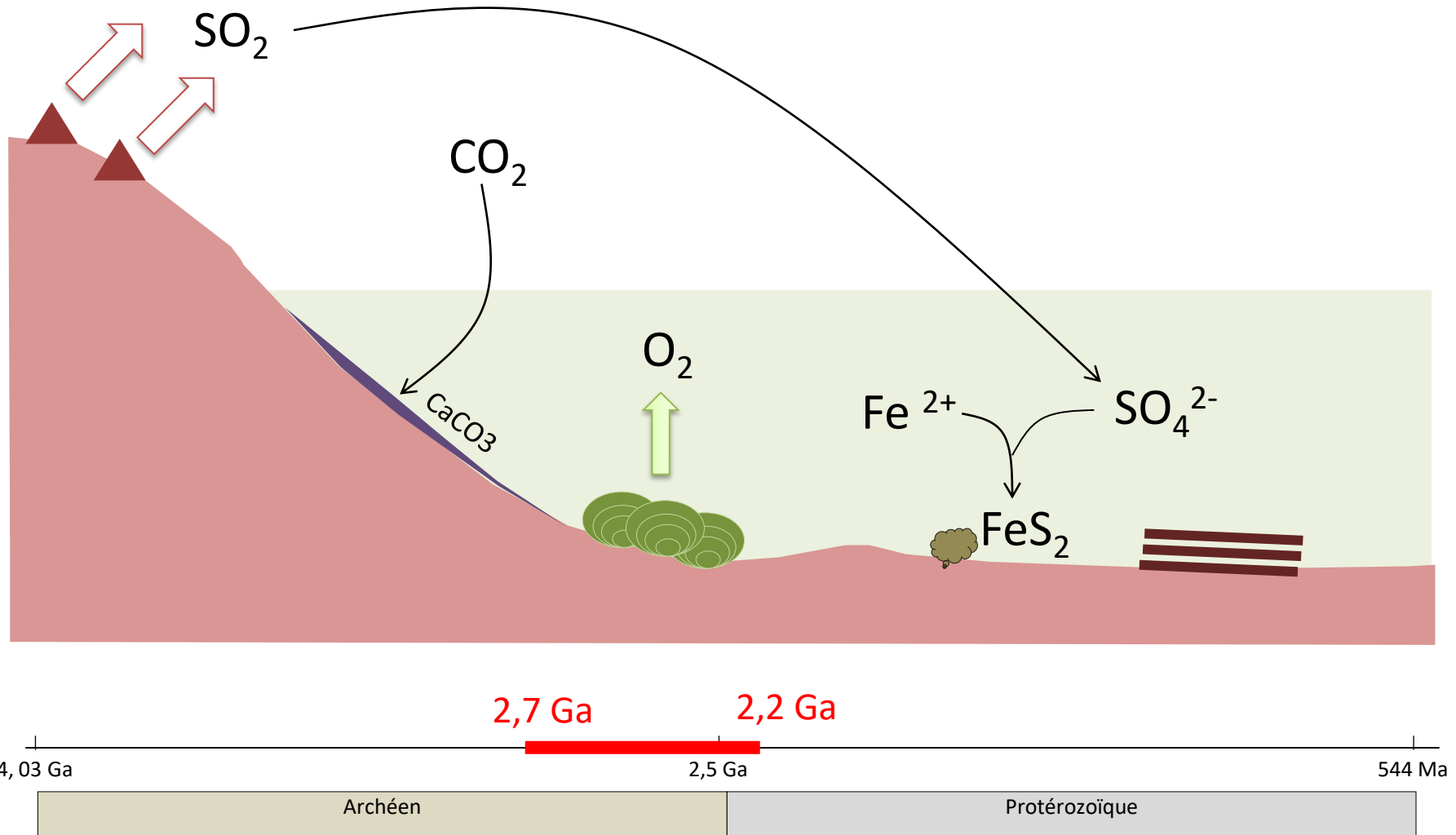
- 3,5 Ga : Apparition de la photosynthèse chez les cyanobactéries (premiers stromatolites) → production d'O₂
- L'océan reste globalement réduit car l'O₂ est piégé par le fer et sert à oxyder la matière organique
- Le fer précipite sous forme FeO₃ → BIF (Banded Iron Formations), sédiments alternativement réduits et oxydés



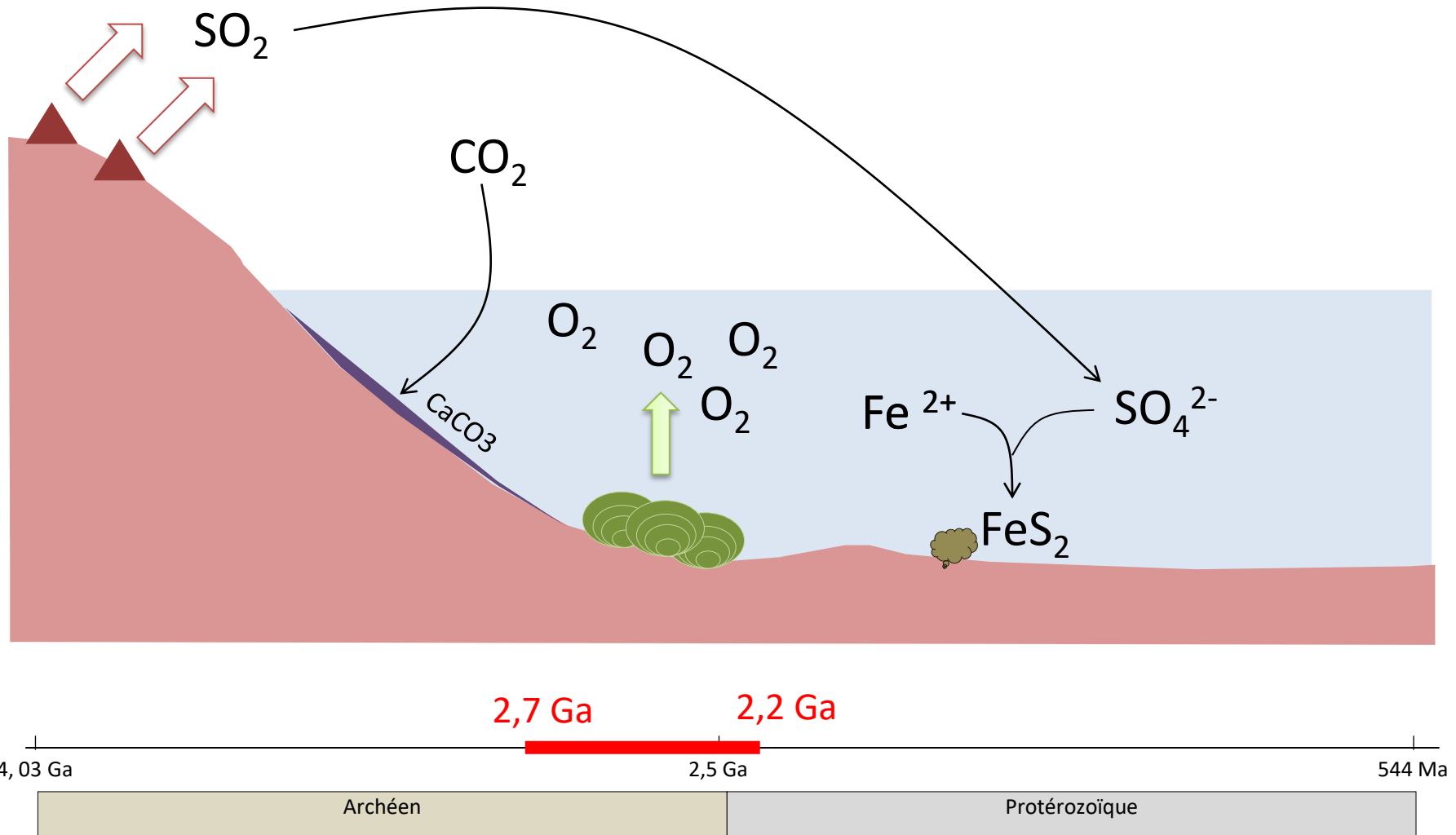
- A partir de -2,7 Ga: Période de forte production de croûte continentale → Plus de reliefs émergés → volcanisme aérien qui produit des gaz riches en soufre oxydé (SO_2)
- Diminution importante probable de la teneur en CO_2 atmosphérique (précipitation des carbonates)



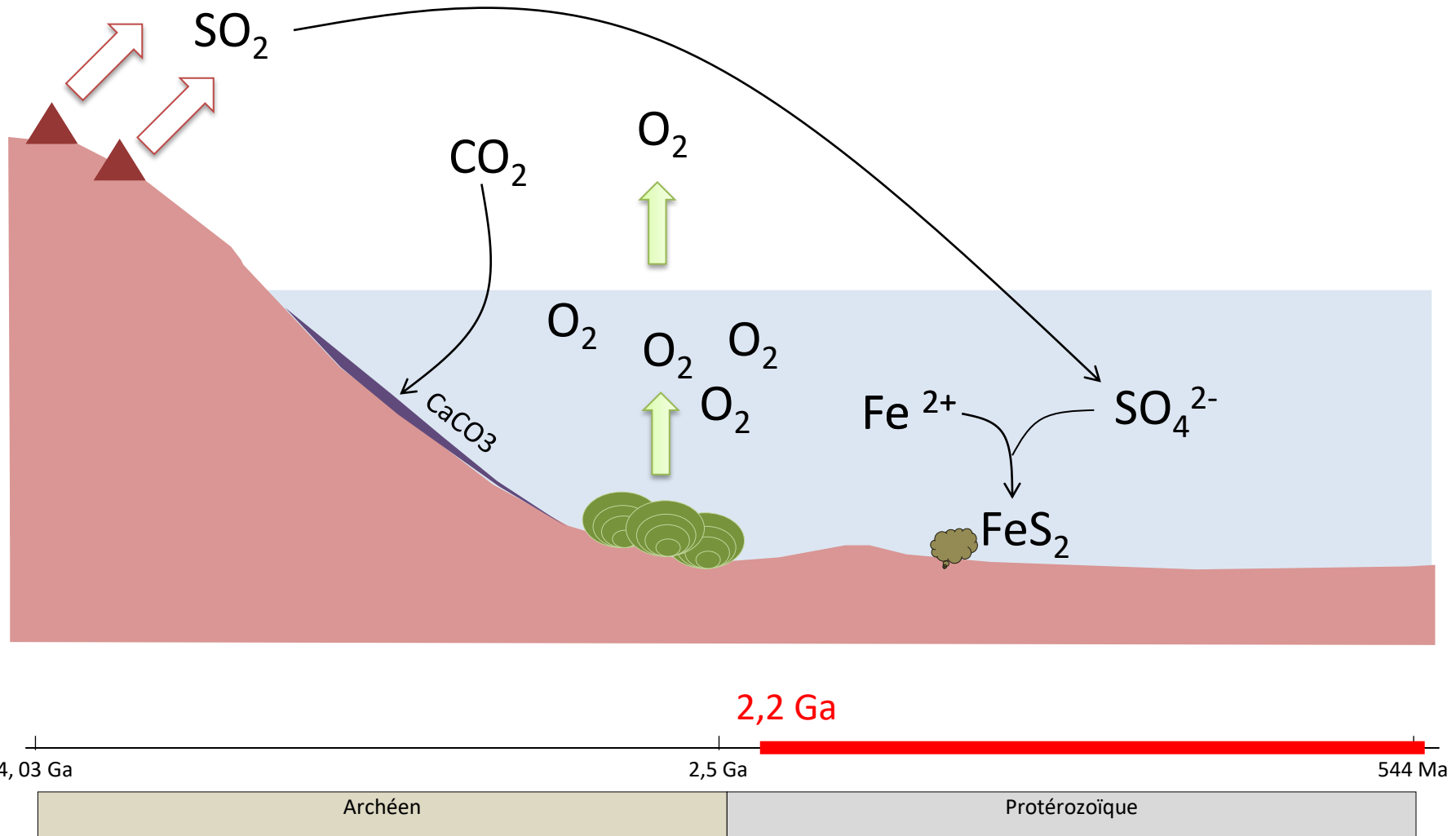
- A partir de -2,7 Ga: Le SO_2 passe en solution dans les océans qui s'enrichissent en sulfates (SO_4^{2-})
- Dans les fumeurs noirs, les sulfates sont réduits en sulfure de fer $\text{FeS}_2 \rightarrow$ Le Fe^{2+} , ainsi fixé, n'est plus oxydé par l'oxygène qui s'accumule alors dans les océans.



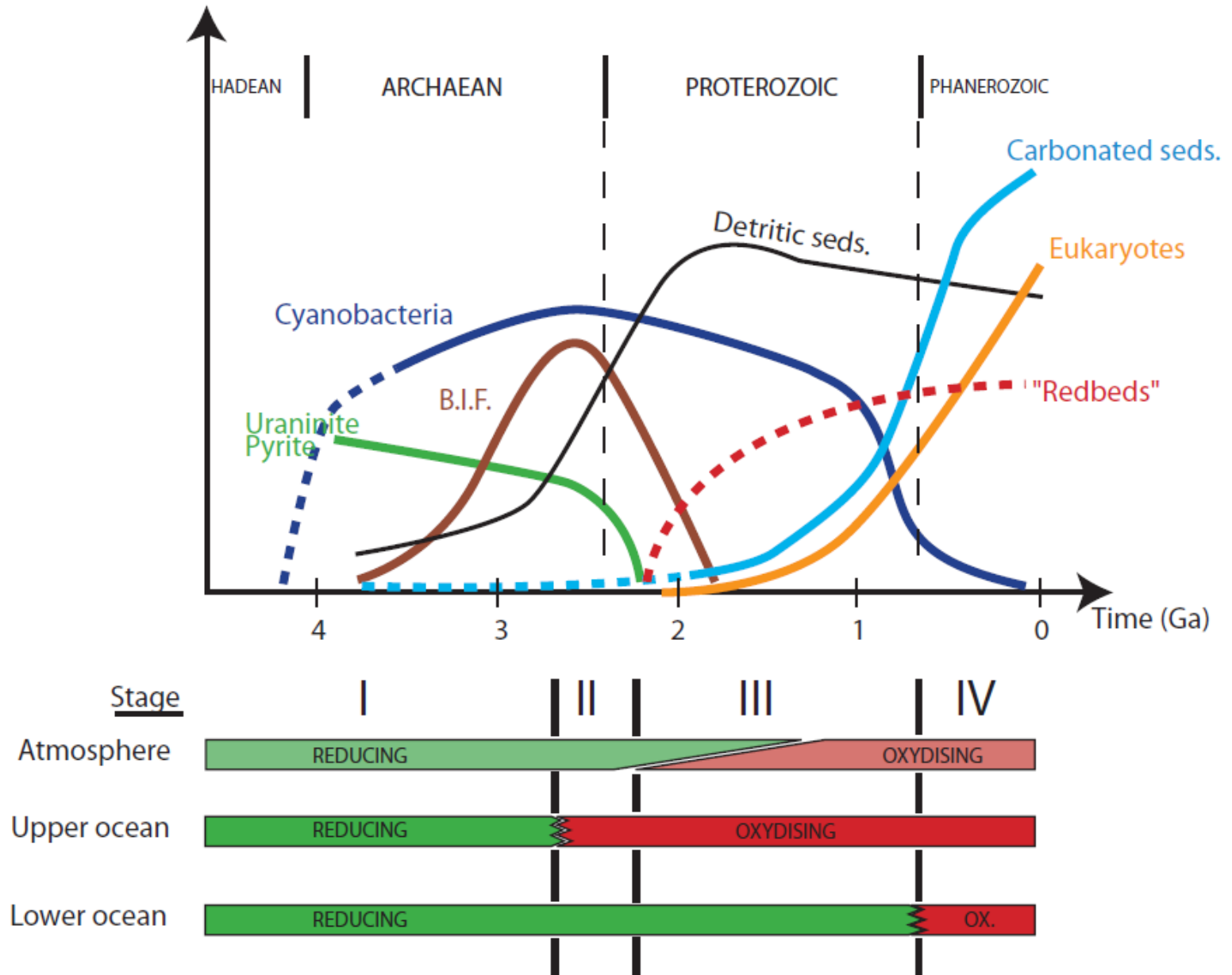
- A partir de -2,7 Ga: Le SO_2 passe en solution dans les océans qui s'enrichissent en sulfates (SO_4^{2-})
- Dans les fumeurs noirs, les sulfates sont réduits en sulfure de fer $\text{FeS}_2 \rightarrow$ Le Fe^{2+} , ainsi fixé, n'est plus oxydé par l'oxygène qui s'accumule alors dans les océans.



- A partir de -2,2 Ga, les océans sont saturés en O_2 . L'atmosphère s'enrichit peu à peu en O_2 .



Bilan en quelques courbes !

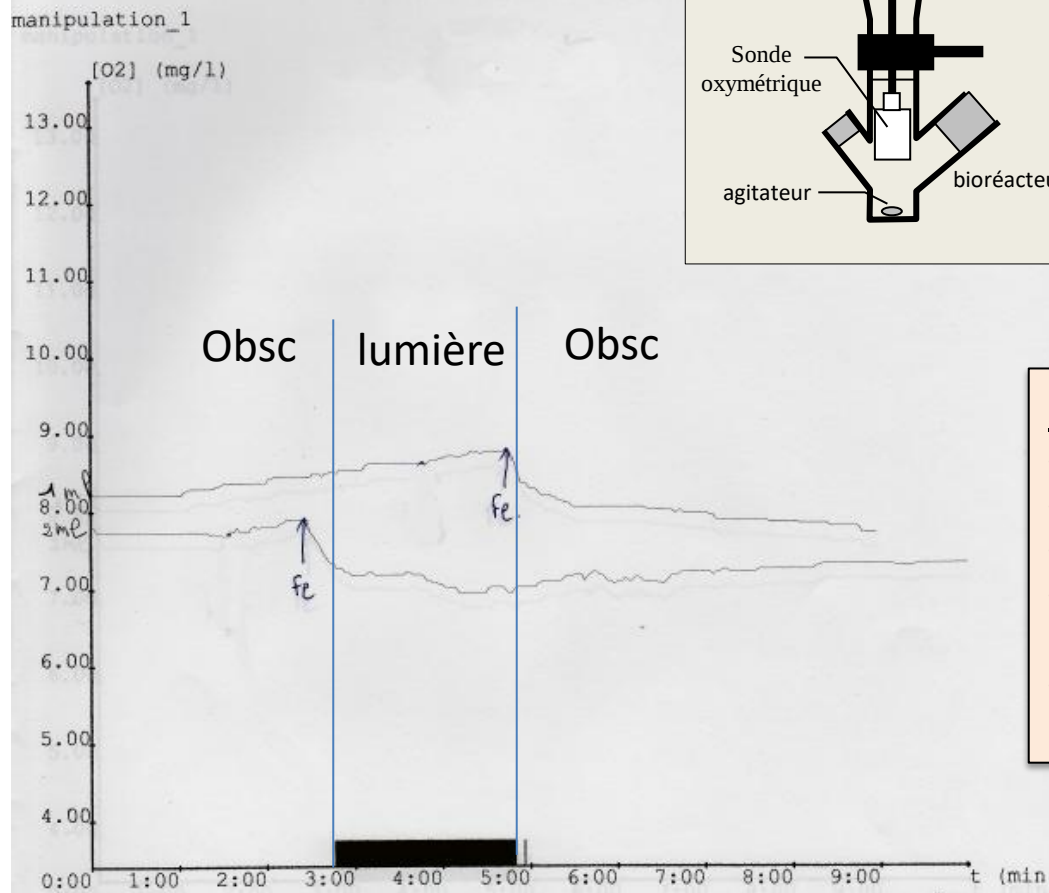
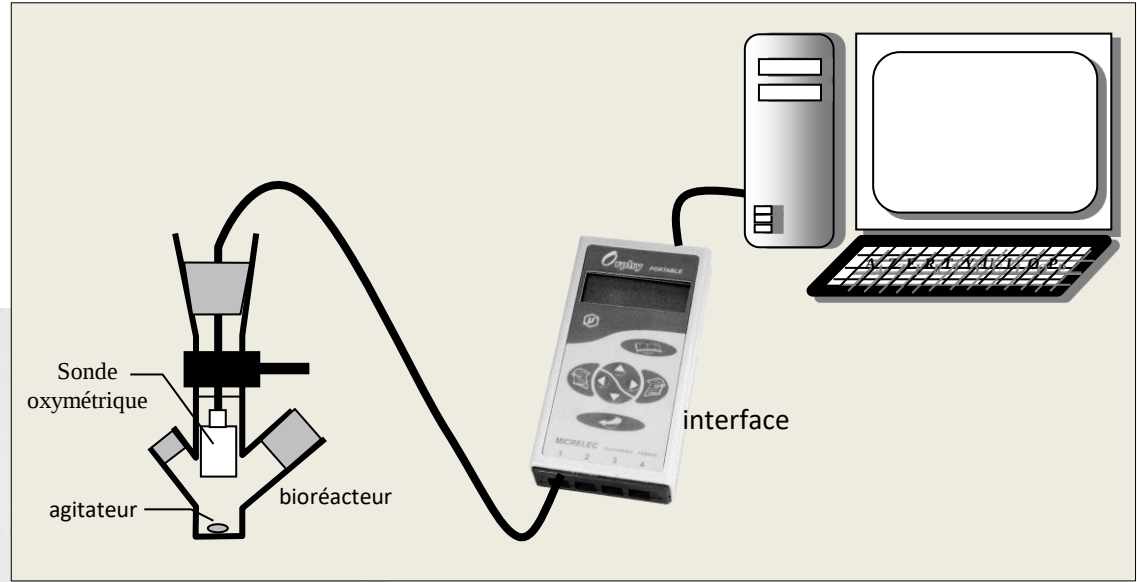


Matériel:Dispositif ExAO (sonde O₂)

Sulfate de Fer II à 1 Mol.L-1

Eau bouillie

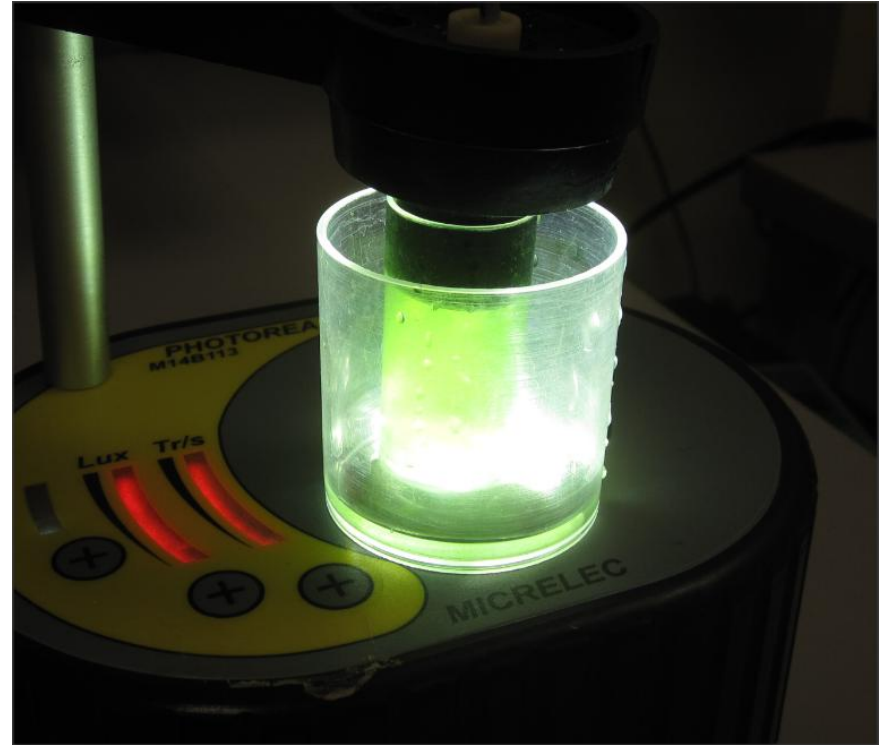
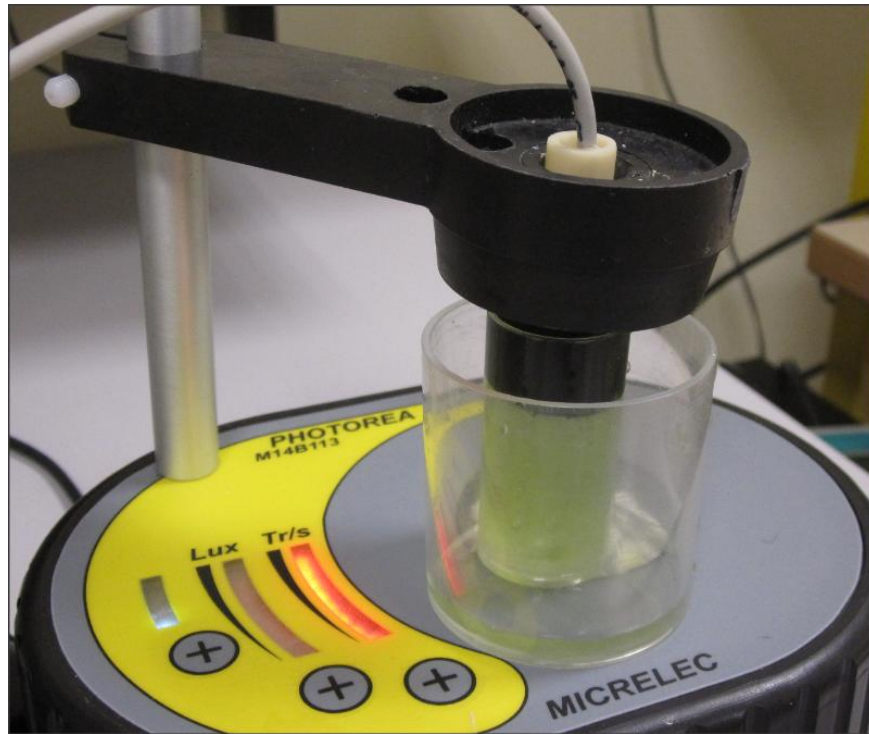
Elodées ou équivalent

Déroulement

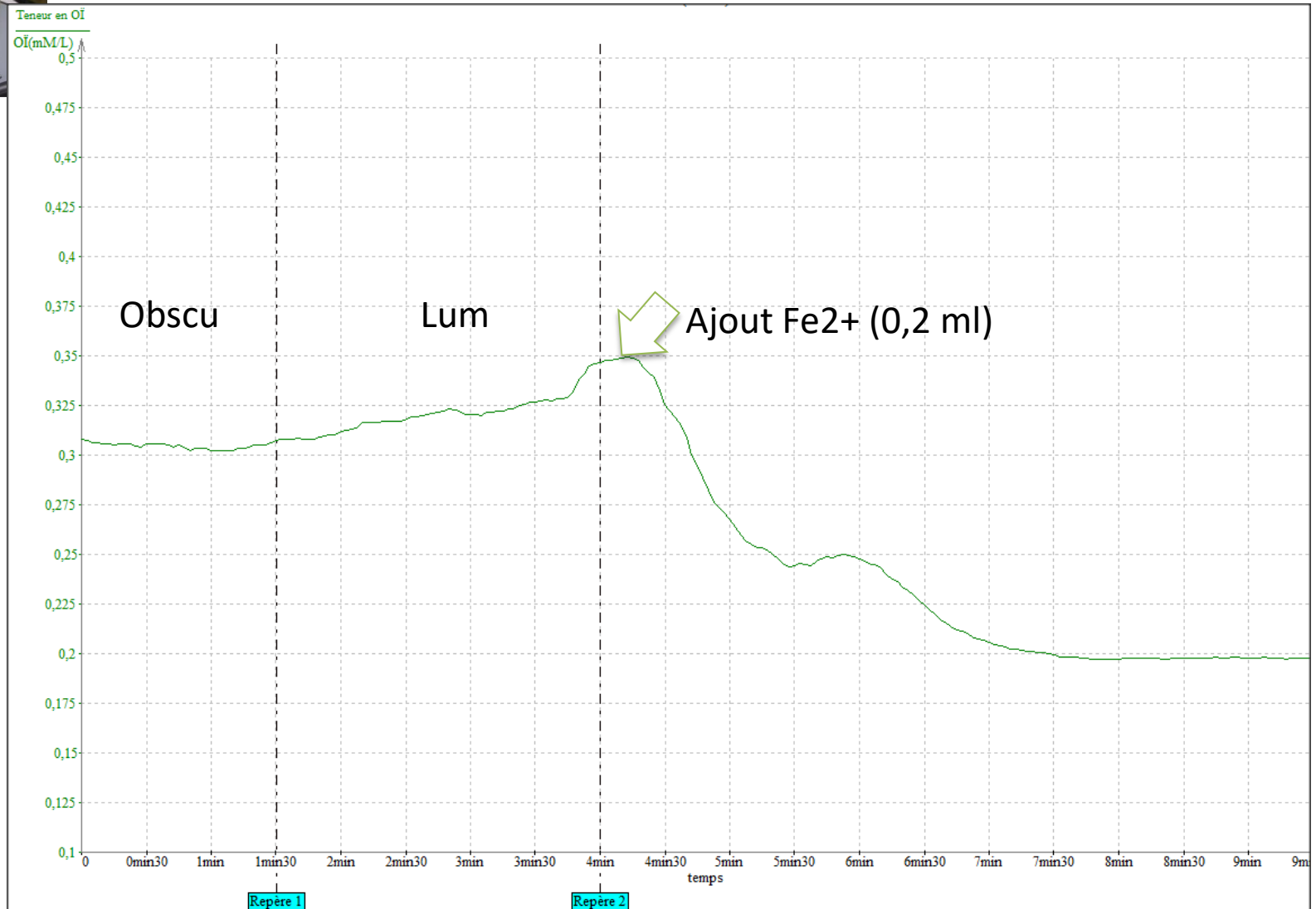
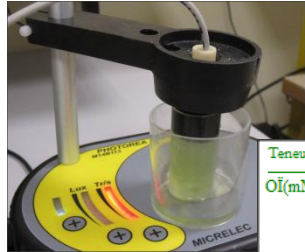
- Remplir le bioréacteur d'eau bouillie
- Ajouter les élodées
- Commencer l'enregistrement à l'obscurité
- A t = 3 Min, injecter 1 ml de sulfate de Fer II puis allumer
- Témoin: idem mais pas d'injection de sulfate de Fer II

Objectif : Simuler la fixation de l'O₂ par le Fer réduit dans les océans primitifs

Variante avec des algues unicellulaires



Variante avec des algues unicellulaires



Processus qui gouvernent la composition

- Photochimie
- Thermochimie
- Transport
- Sources et pertes (réservoirs)

Origine
(nébuleuse primitive)

Composition actuelle

?

Processus responsables de l'évolution

Impacts

- Disparition de l'atmosphère
- Apports continus et sporadiques

Echappement

- Processus thermique et ionosphérique
- Action du vent solaire

Sources d'énergie

- Photons, UV, IR
- Energie interne

Géologie

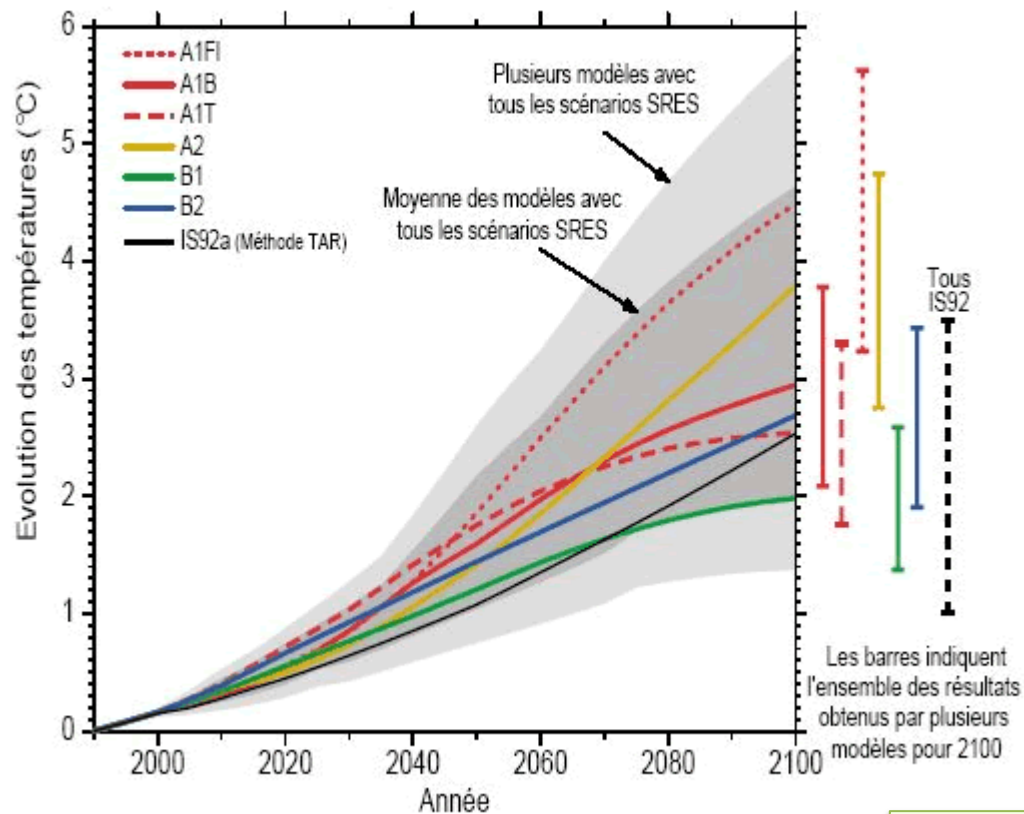
- Tectonique des plaques
- Volcanisme
- Sédimentation

Géochimie

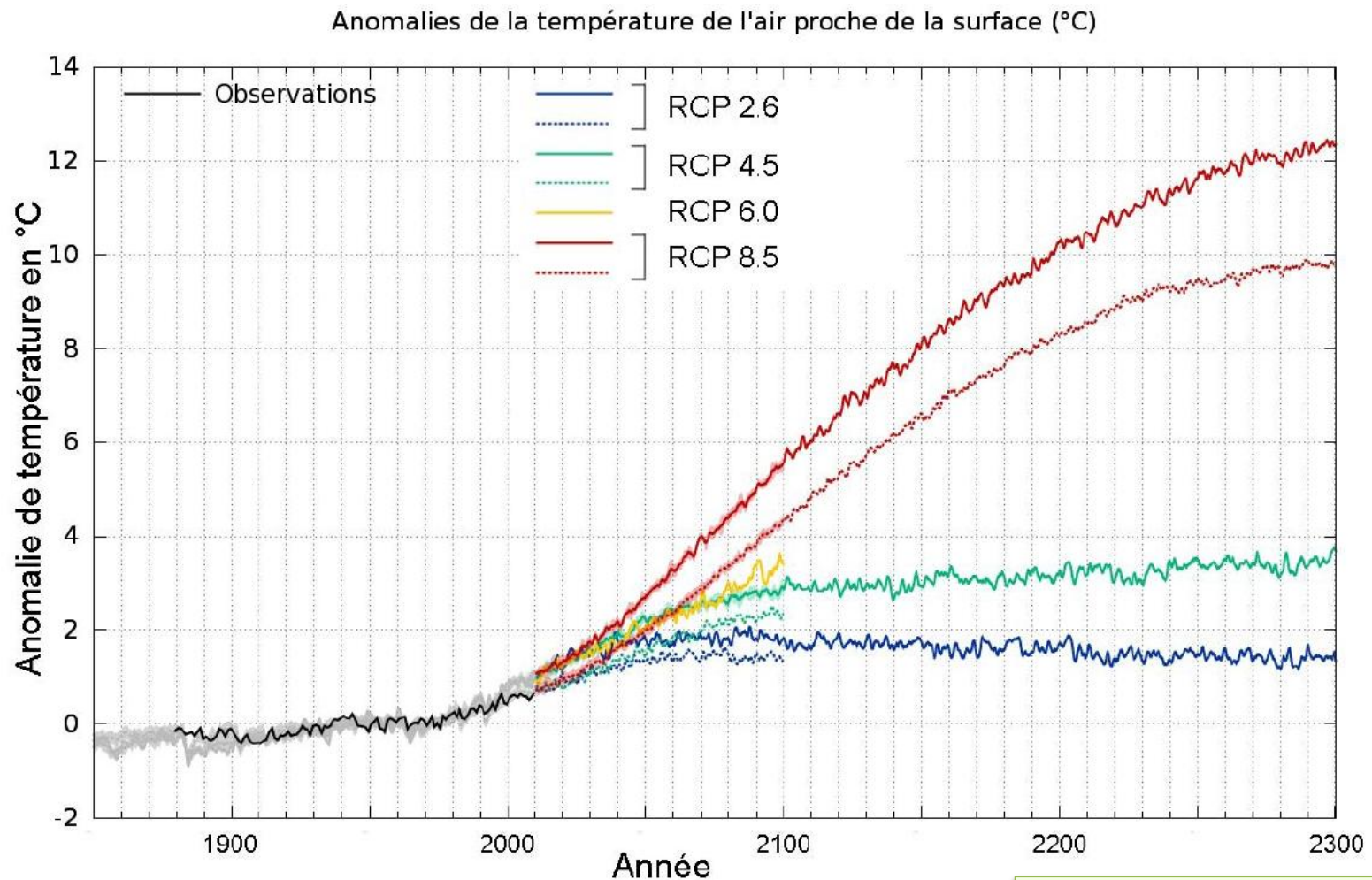
- Photosynthèse
- Décomposition

L'Evolution future du climat...

Prévisions du GIEC obtenues en 2004 à partir de différentes simulations



+ 2 à + 4 °C en 2100



+ 1 à + 5 °C en 2100

A l'échelle des prochain 1000 ans

Il y a entre 40 et 80 ans de réserve de pétrole, le double ou le triple de gaz, pour quelques siècles de charbon.

Donc dans 100 à 500 ans, l'augmentation du CO₂ et de la température s'arrêteront par la force des choses et le CO₂ « redescendra » en quelques siècles...

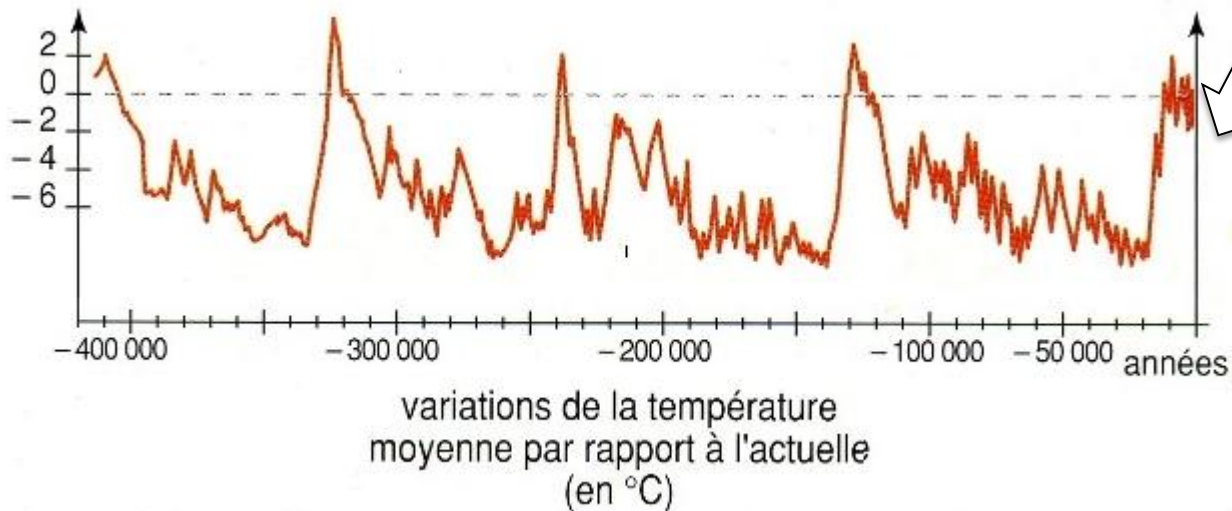


A l'échelle de quelques dizaines de milliers d'années

Depuis quelques millions d'années, la température moyenne de la Terre oscille entre $+10$ et $+16^{\circ}\text{C}$.

On est actuellement à $+14^{\circ}\text{C}$

L'astronomie nous indique que la prochaine glaciation commencera dans 40 000 à 80 000 ans

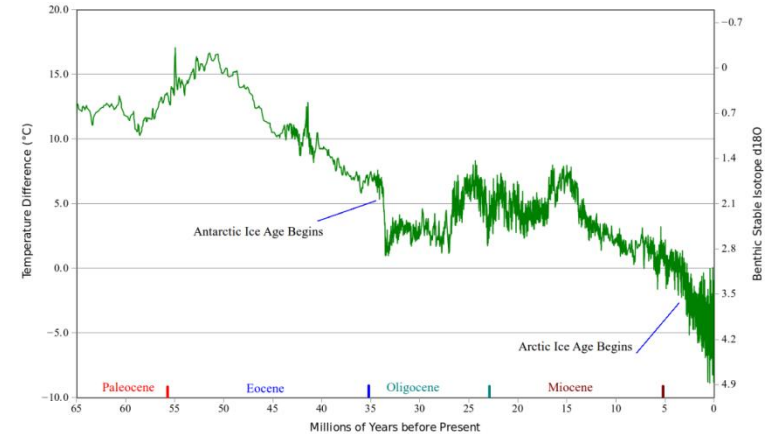
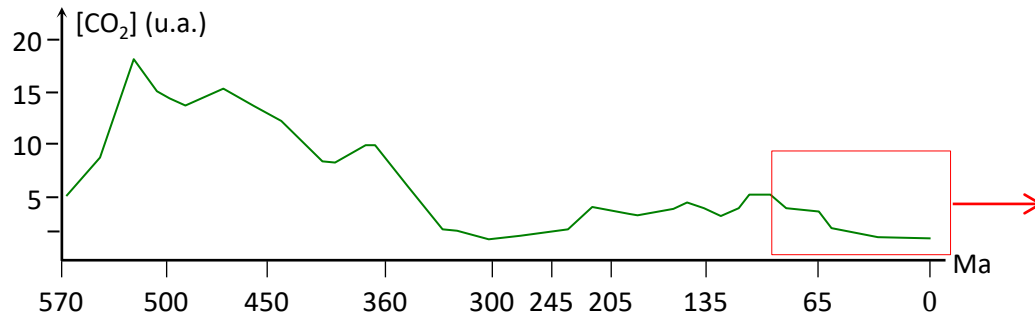


Glaciation à venir !



A l'échelle des prochains MA

Depuis 80 MA, la tendance globale est à la baisse de CO₂. La température a aussi baissé d'une dizaine de °C

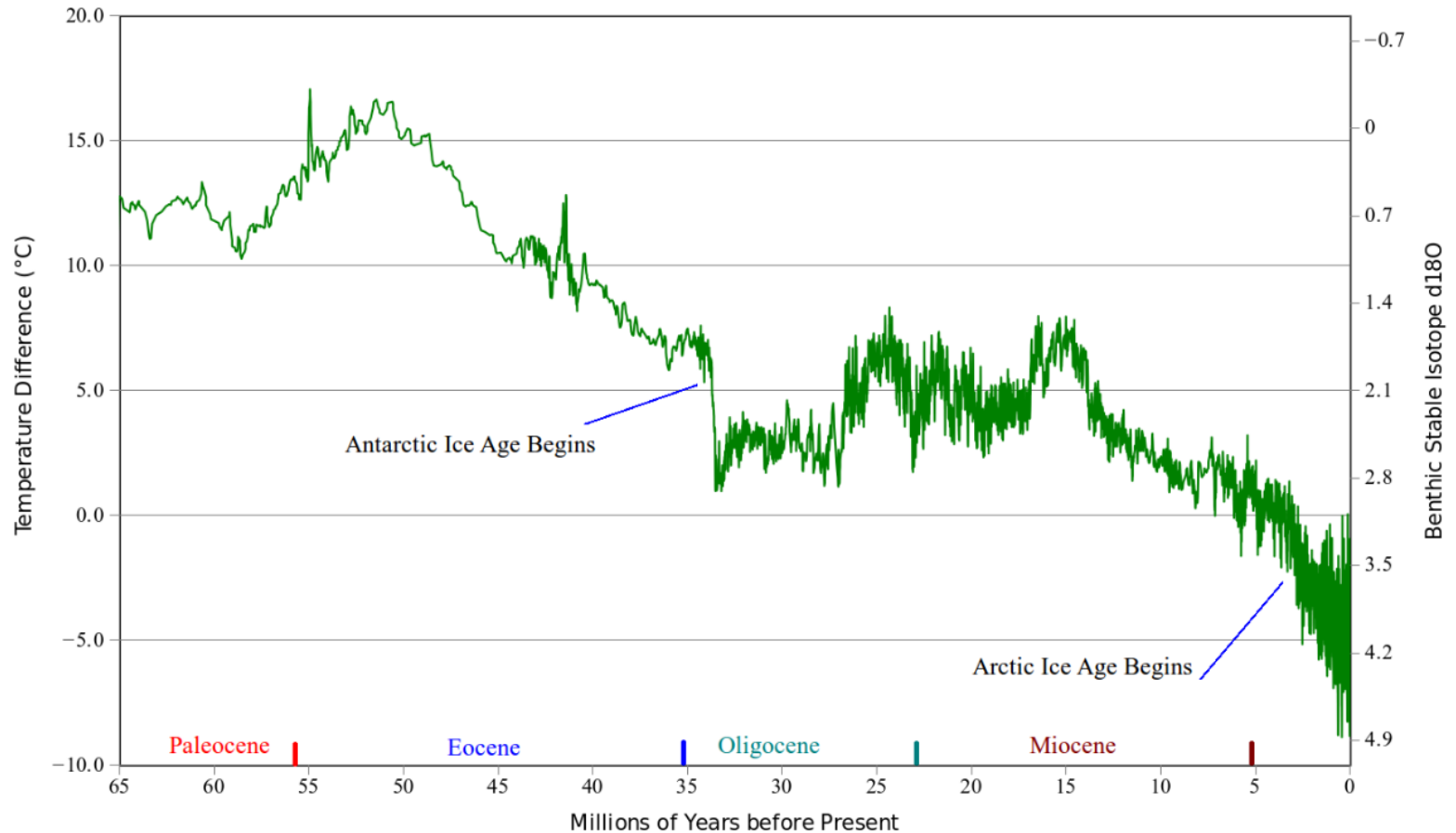


On peut supposer que le « froid » actuel durera tant que durera l'Himalaya (pompe à CO₂).
...On est tranquille pour pas mal de millions d'années !!!

Quand l'Himalaya sera aplani, le CO₂ devrait remonter, et la température aussi, à moins que d'autres montagnes ne se forment en pays intertropical.

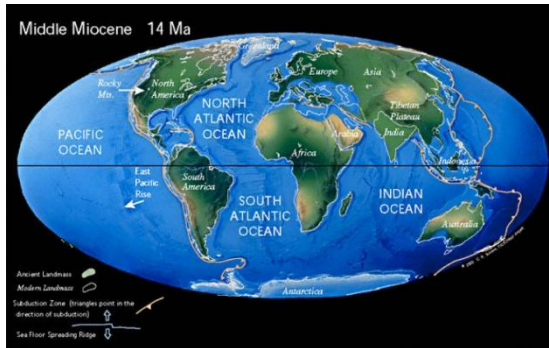
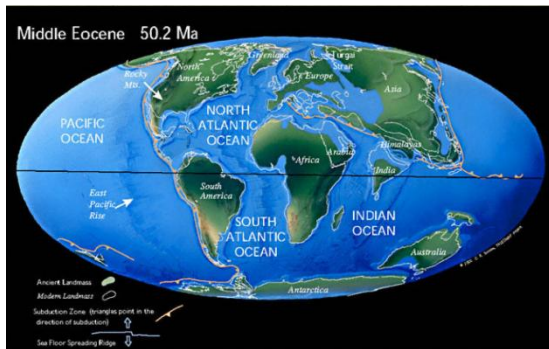
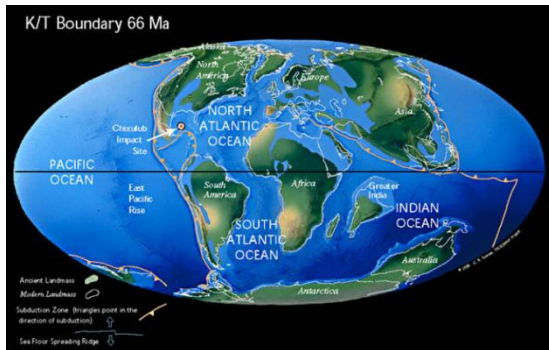


Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya

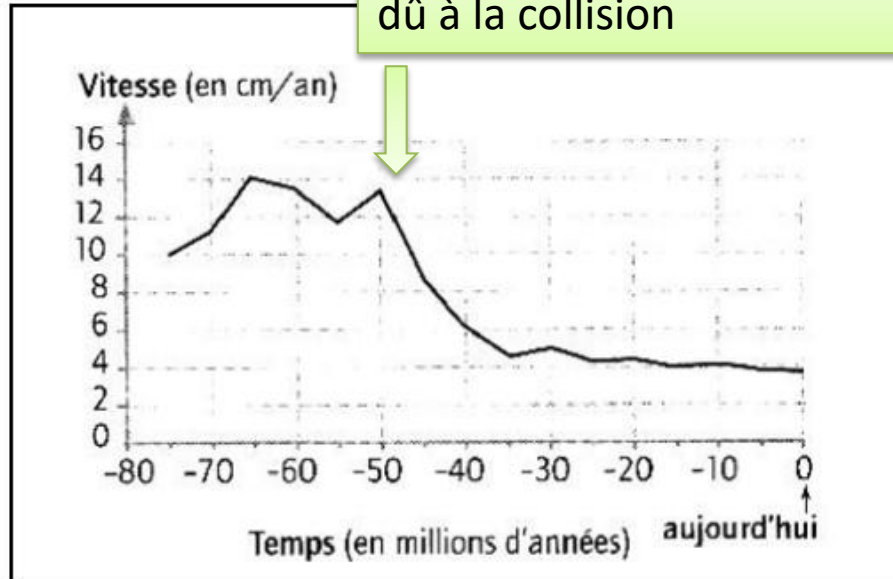


Refroidissement de 15° C depuis 50 MA

Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya



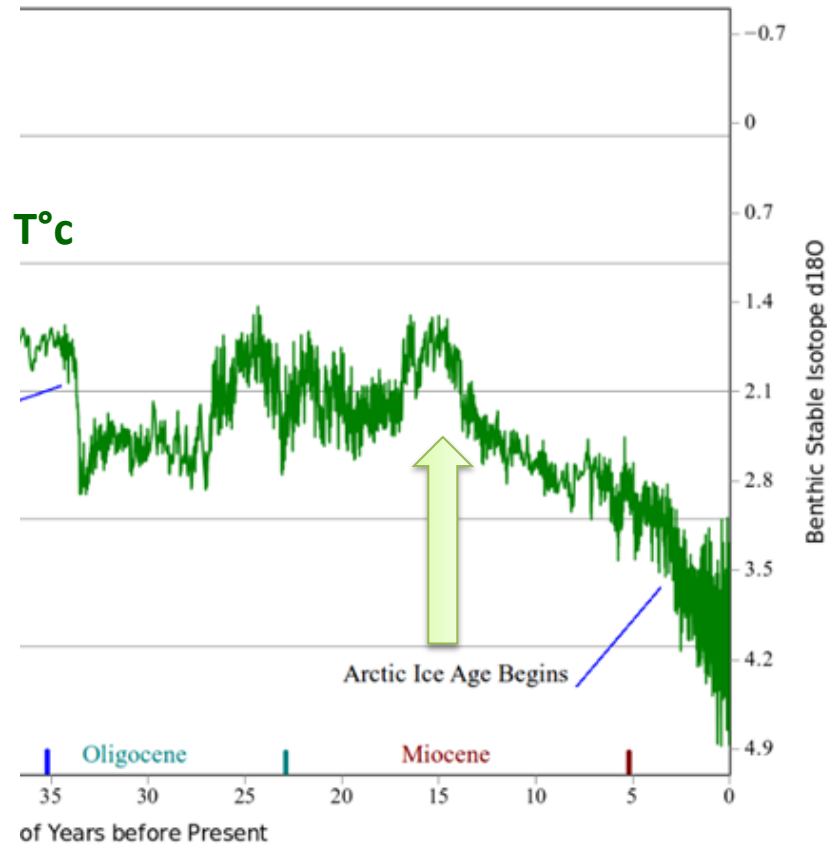
Ralentissement de vitesse dû à la collision



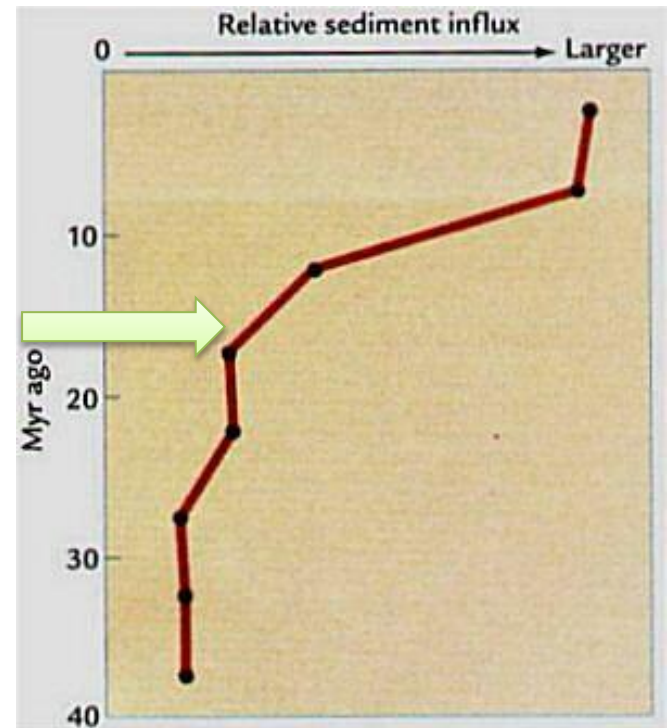
Evolution de la vitesse de déplacement de la plaque indienne

On estime que la formation de l'Himalaya a débuté après 50 MA

Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya



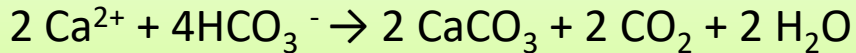
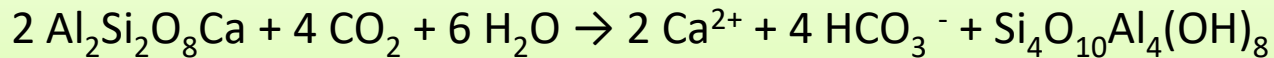
Estimation de la variation du flux sédimentaire (Gange)



Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya

Données:

Réaction d'altération d'un silicate calcique (feldspath plagioclase) et précipitation des carbonates



Granite montrant des feldspaths altérés

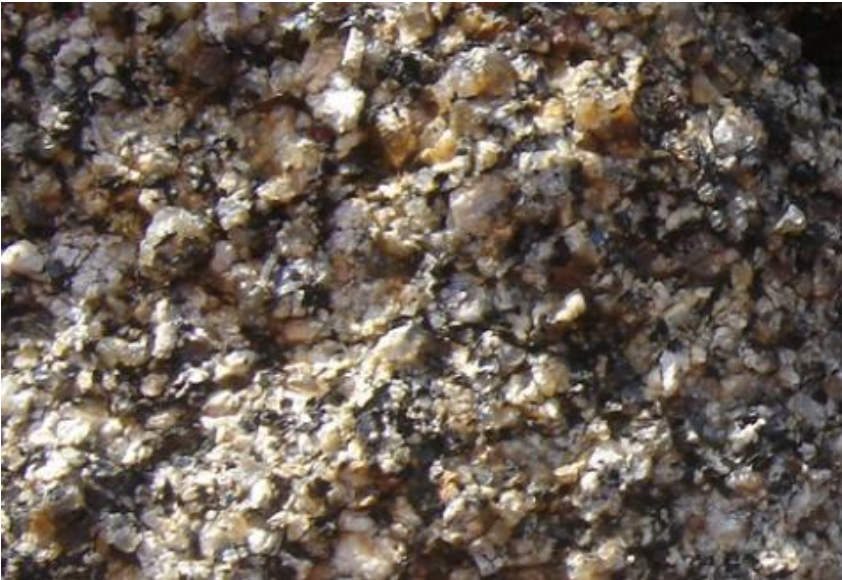
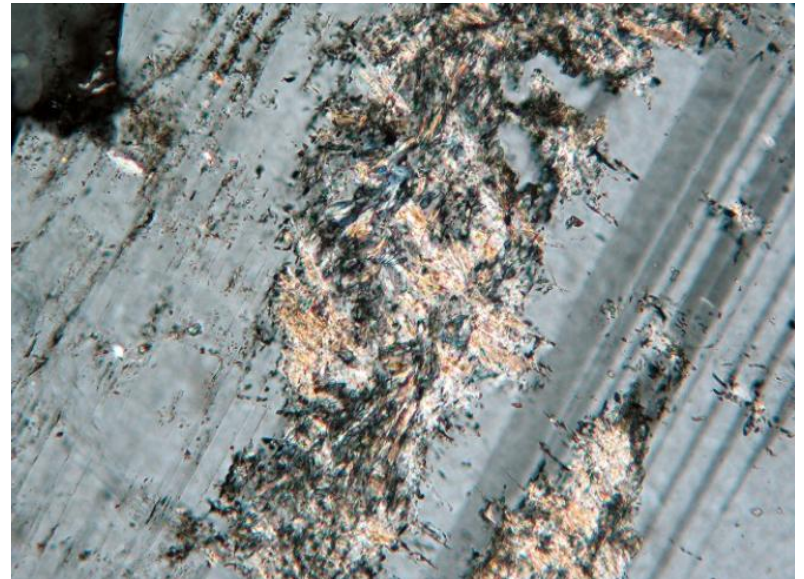
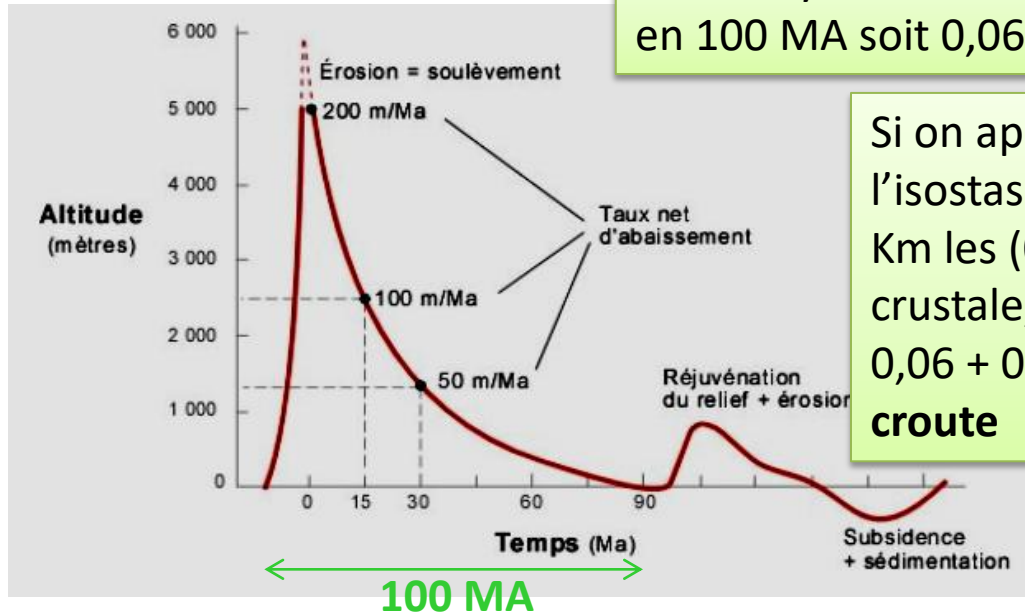


Photo en LPA d'un F. plagioclase altéré



Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya

Données:



Taux moyen d'ablation des hauts reliefs : 6 Km en 100 MA soit 0,06 Km / MA

Si on applique le principe de l'isostasie, il faut ajouter aux 0,06 Km les $(0,06 \times 4,5)$ Km de racine crustale, ce qui fait un total de $0,06 + 0,27$ soit **0,33 Km / MA de croûte**

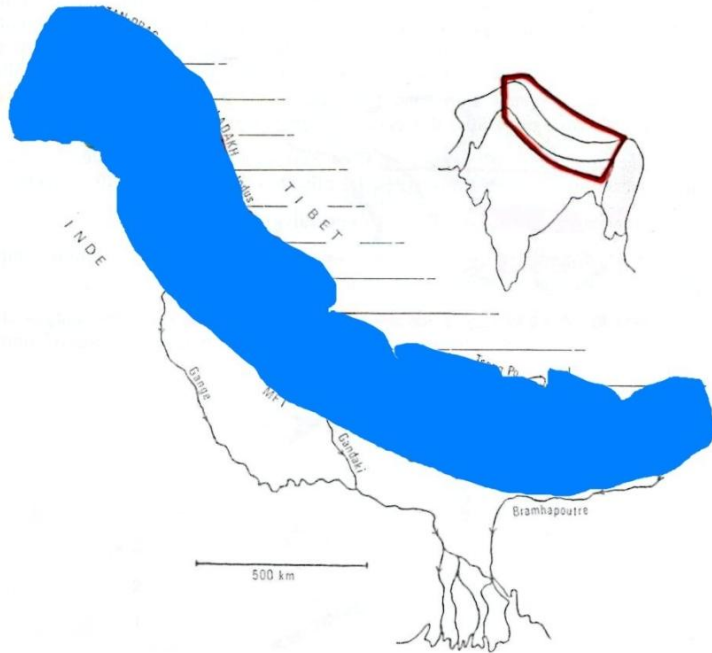
Quantité de silicates calciques dans la croûte continentale : 2%

Densité moyenne des roches : 3000 Kg/m³

Quantité actuelle de CO₂ atmosphérique : 750 Gt de C soit 2750 Gt de CO₂

La masse de CO₂ consommé correspond à 78% de la masse des silicates calciques altérés.

Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya



Mesure de la surface occupée par l'Himalaya par Google Earth et (ou) Mesurim



→ Surface = 668 000 Km²

Etablir une relation explicative entre refroidissement au cours du tertiaire et altération de l'Himalaya

On peut calculer la quantité de CO₂ fixé par l'érosion d'une épaisseur de 0,33 km d'Himalaya (ce qui est érodé en 1 MA)

Les données (à fournir par l'expérimentateur)

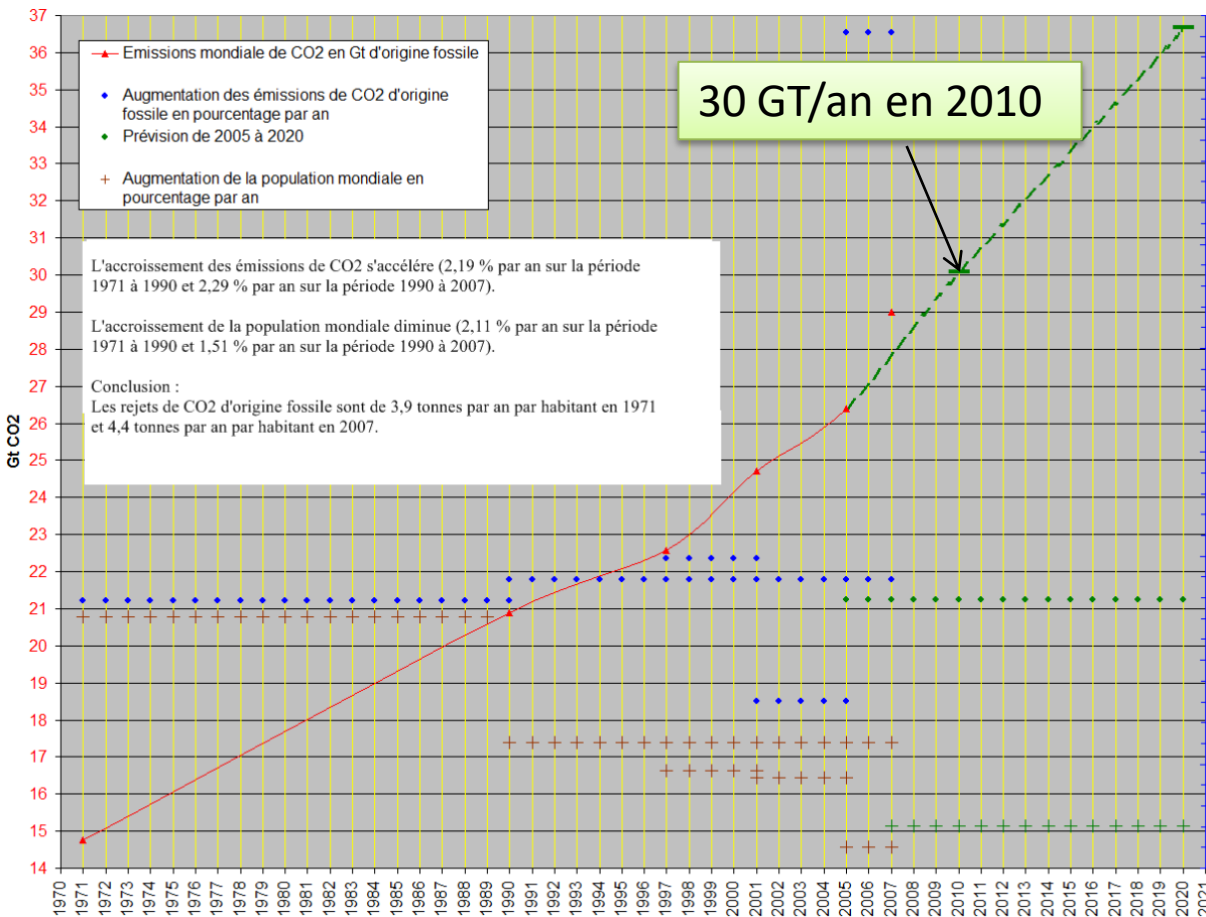
Surface totale du massif montagneux	668 000	en km ²	Entrez la valeur de la surface	
Epaisseur de croûte disparue	0,33	en Km	Entrez l'épaisseur de croûte érodée	
Densité moyenne des roches	3000	en kg/m ³		
Quantité de silicates calciques	2	en % de la croûte continentale		
Les résultats				
Hauteur disparue	0,33	en km		
Volume de roche disparu	220440	en km ³		
Masse des roches disparues	6,6132E+17	en kg		
Masse de silicates calciques altérés	1,32264E+16	en kg		
Quantité de CO ₂ consommé	1,03166E+16	en kg	10316,59	en GT
Cette quantité de CO ₂ correspond à	4	fois la quantité contenue actuellement		
Si seulement 10% des silicates calciques sont altérés :	0,4	fois la quantité contenue actuellement dans l'atmosphère		

soit environ 1031 GT/MA de CO₂ fixé
Ce qui fait 41 240 GT de CO₂ fixé depuis 40 MA

A titre de comparaison, le réservoir atmosphérique actuel contient 750 GT de C soit 2750 GT de CO₂

Depuis 40 MA, l'érosion de l'Himalaya a fixé l'équivalent d'environ 15 fois la quantité actuelle de CO₂

Une mise en relation intéressante ...

Emissions mondiale de CO₂ d'origine fossile en GT/an

Or on a vu que:

L'érosion de l'Himalaya fixe 1031 GT/MA de CO₂ soit 0,001 GT de CO₂ par an

Sur un an, l'homme produit 30 000 fois plus de CO₂ que ce qui peut être fixé par l'érosion de l'Himalaya.
...Il y a vraiment de quoi s'inquiéter, même s'il ya d'autres processus contribuant à la fixation du CO₂ !



A l'échelle du Ga, le CO₂ baisse. Il a été divisé par 100 000 depuis l'origine de la Terre. Cette diminution est due essentiellement à l'accroissement lent et progressif de la quantité des calcaires terrestres.

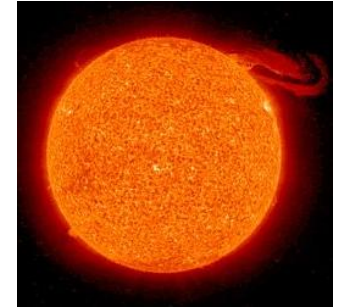
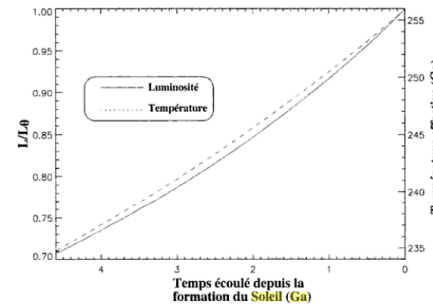


Mais pendant la même époque, l'énergie rayonnée par le soleil a augmenté de 50%



On peut donc dire qu'en gros, à quelques oscillations près, la hausse d'activité solaire a été compensée par la baisse du CO₂. Cela a permis à la Terre de conserver une température entre 0° et 100° (sauf une ou deux fois, il y a -650 MA, époque où la Terre a sans doute été entièrement gelée, des pôles à l'équateur !)

...Mais la puissance rayonnée par le Soleil va continuer d'augmenter !



2 scénarios sont envisageables:

1 – L'augmentation de l'activité solaire sera compensée par la formation des calcaires (ça marche très bien depuis 4 GA !!!)

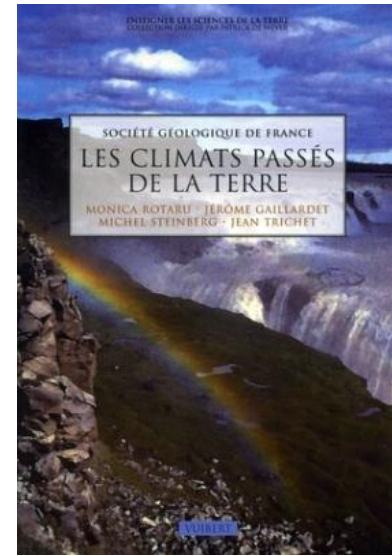
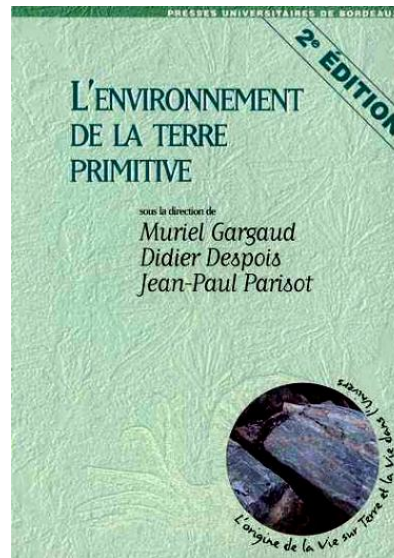
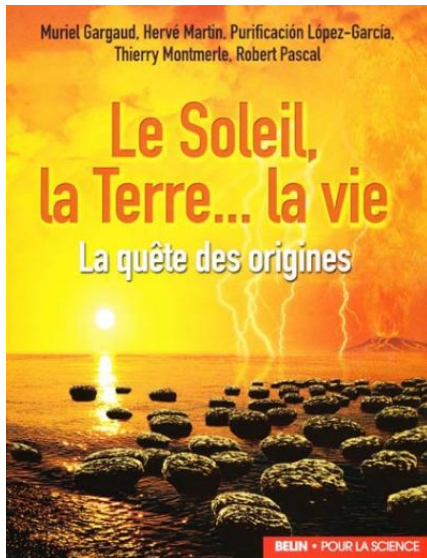
La température sera constante mais le CO₂ deviendra tellement bas que la photosynthèse deviendra impossible (on est mal barrés !!!)



2 – La précipitation des calcaires n'absorbera pas assez de CO₂ et l'effet de serre ne diminuera pas assez... La température augmentera et la vie deviendra impossible...



BIBLIOGRAPHIE



L'Evolution de l'atmosphère, article de Jean François MOYEN, 2007

<http://planet-terre.ens-lyon.fr>

http://accs.ens-lyon.fr/accs/terre/CCCIC/ccl/biosphere/climat_ccl