

## L'atmosphère primitive et son évolution



Ce qu'a peut-être été la Terre il y a plus de quatre milliards d'années

*Combien de temps la Terre primitive est-elle restée une fournaise de magma ? Sans doute moins longtemps que les 500 millions à un milliard d'années souvent admis. En effet, l'étude des matériaux terrestres les plus anciens montre que des conditions suffisamment clémentes pour que la croûte terrestre se forme se sont imposées bien plus tôt.*

*John VALLEY, professeur de géologie à l'Université du Wisconsin-Madison, USA.*

Source : [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/f/fiche-article-une-terre-jeune-et-froide-24765.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-une-terre-jeune-et-froide-24765.php)

Pb : Nous connaissons assez précisément la composition de l'atmosphère actuelle mais sur quoi se fondent les hypothèses sur la composition de l'atmosphère primitive ?

### I- Une atmosphère initiale bien différente de l'actuelle

#### 1- Formation de l'atmosphère primitive

Les météorites sont des pierres d'origine extraterrestre qui sont tombées à la surface de la Terre. Certaines sont sur la Terre depuis des milliers d'années, mais il en tombe régulièrement. On a identifié plus de 25 000 météorites autour du monde : 18 000 proviennent de l'Antarctique et quelques milliers d'entre elles des déserts d'Afrique et d'Asie. Les météorites sont probablement issues de regroupements de fragments qui résultent de collisions entre des objets plus gros.

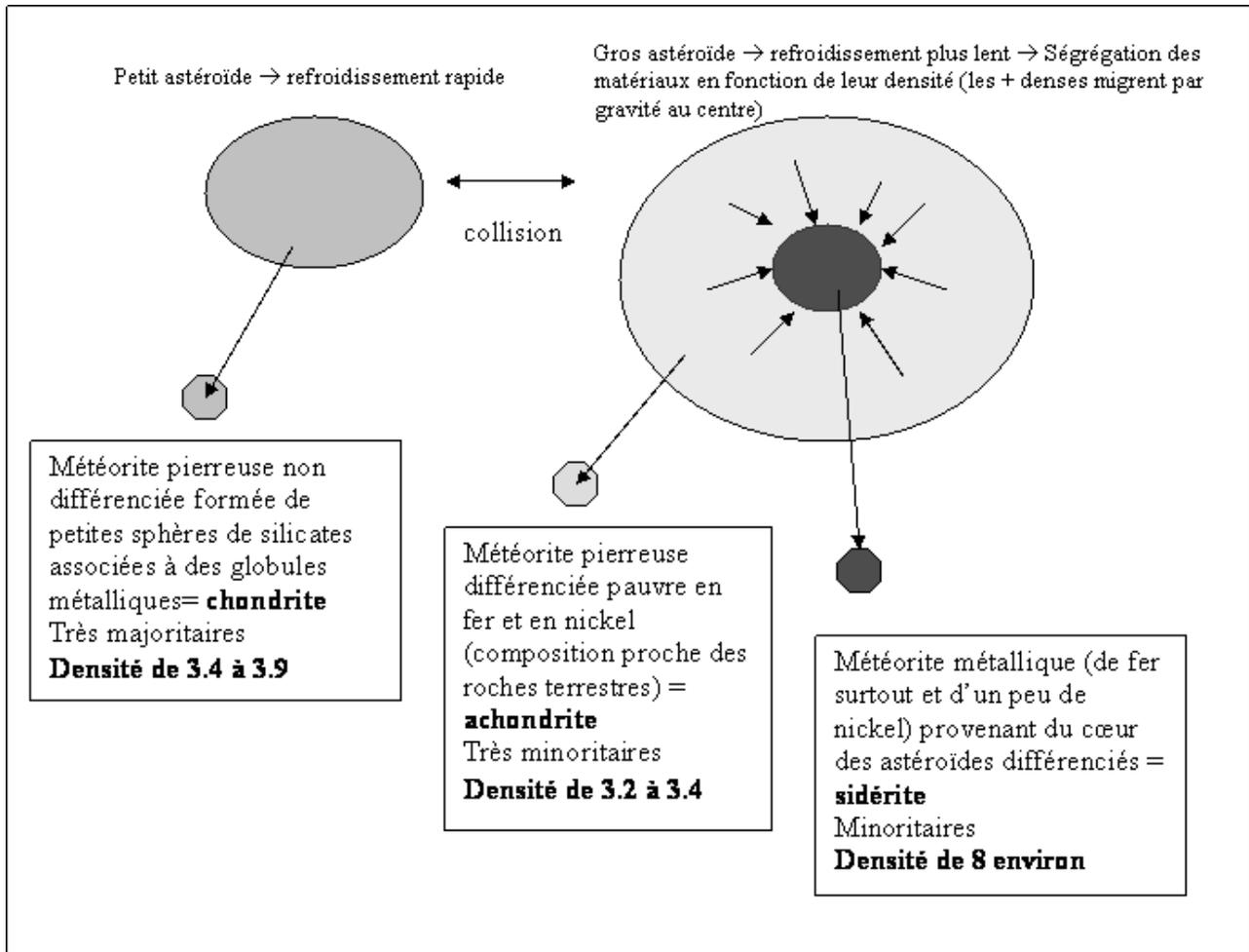
Il existe trois grandes familles de météorites : les pierreuses, les métalliques et les mixtes. C'est la proportion de métal que contient la météorite qui détermine à quelle famille elle appartient. Les météorites métalliques sont composées à 98 % de fer-nickel, les mixtes en contiennent 50 % et les pierreuses, entre 20 et 27 %.

Les différentes familles de météorites ne percutent pas la Terre dans les mêmes proportions. La très grande majorité d'entre elles, 93 %, sont des pierreuses. Les métalliques sont beaucoup moins fréquentes,

elles comptent pour seulement 6 % des chutes. Finalement, les météorites mixtes sont les plus rares avec 1 % des météorites.

Au départ, les corps-parents avaient tous une composition uniforme. Les planétoïdes devenus suffisamment gros se sont réchauffés et différenciés. Lors de la différenciation, les métaux lourds se condensent au centre, les éléments un peu moins lourds s'accumulent autour et les plus légers forment la croûte. Chaque zone de l'astéroïde donne naissance à une classe spécifique de météorites différenciées.

Source : Planétarium de Montréal



Les **chondrites** 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.

En chauffant fortement des chondrites, on provoque leur dégazage. Le *tableau* présente les résultats obtenus.

Gaz obtenus par chauffage d'une chondrite (en %)

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| H <sub>2</sub> O .....           | 80 |
| CO <sub>2</sub> .....            | 12 |
| N <sub>2</sub> .....             | 5  |
| Autres gaz (SO <sub>2</sub> ...) | 3  |
| O <sub>2</sub> .....             | 0  |

## REMARQUE :

# Pourquoi l'atmosphère manque de xénon

Grâce à des mesures de la solubilité de gaz nobles dans de la pérovskite, deux géochimistes de Bayreuth, en Allemagne, avancent une explication plausible à l'énigme du xénon manquant.

Maurice Mashaal

Le xénon est un gaz noble dont les atomes sont bien plus lourds que ceux d'argon et de krypton, deux autres gaz nobles présents dans l'atmosphère terrestre. Et pourtant, notre atmosphère contient beaucoup moins de xénon, relativement aux gaz nobles plus légers tels que l'argon, que les météorites chondritiques faites du même matériau rocheux qui a donné naissance à la Terre. Comment expliquer ce déficit en xénon ? Selon Svyatoslav Shcheka et Hans Keppler, à l'Université de Bayreuth, en Allemagne, la réponse à ce mystère réside dans la faible solubilité du xénon au sein des pérovskites de  $MgSiO_3$ , composante principale du manteau inférieur de notre planète.



Source : [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/actualite-pourquoi-l-atmosphere-manque-de-xenon-30528.php#liresuite](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actualite-pourquoi-l-atmosphere-manque-de-xenon-30528.php#liresuite)

→ La Terre est une planète différenciée, résultat d'une migration des éléments au cours de son refroidissement. Ses enveloppes fluides sont le résultat du dégazage du manteau supérieur. Les gaz rares se sont dissous dans l'océan de magma primitif (à l'exception du xénon peu soluble) et continuent toujours d'être dégazés par le volcanisme. Les gaz les plus légers se sont échappés dans l'espace (ex : Hélium) et les plus lourds se sont accumulés dans l'atmosphère. Après la vapeur d'eau, le  $CO_2$  est le gaz le plus rejeté par les volcans mais sa concentration dans l'atmosphère actuelle ne représente que 0.03%.

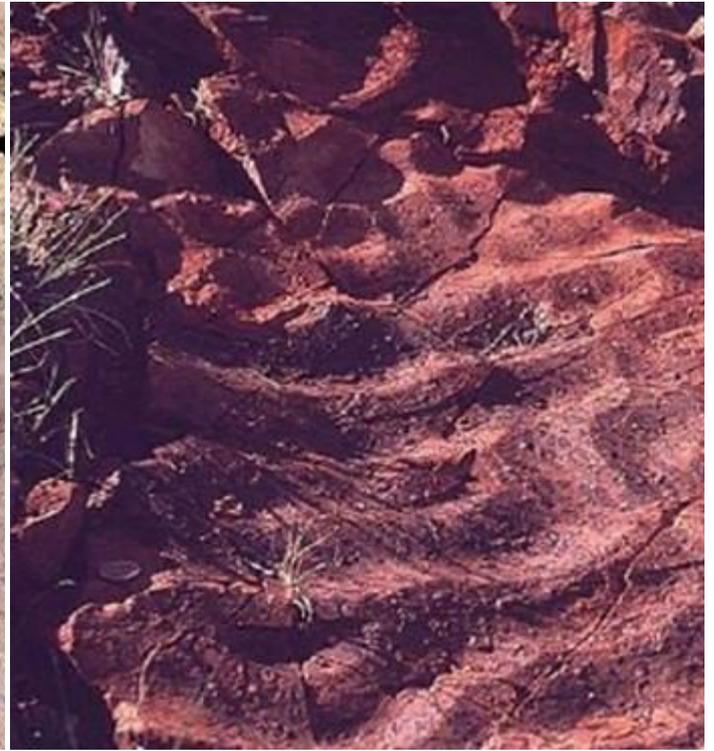
Pb : D'après l'étude des chondrites, les scientifiques pensent que l'atmosphère primitive était beaucoup plus riche en  $CO_2$  : comment se fait-il qu'aujourd'hui il ne représente que 0.03% de l'atmosphère ?

## 2- L'évolution du taux de $CO_2$

Les témoins de la présence d'eau liquide en abondance à l'Archéen



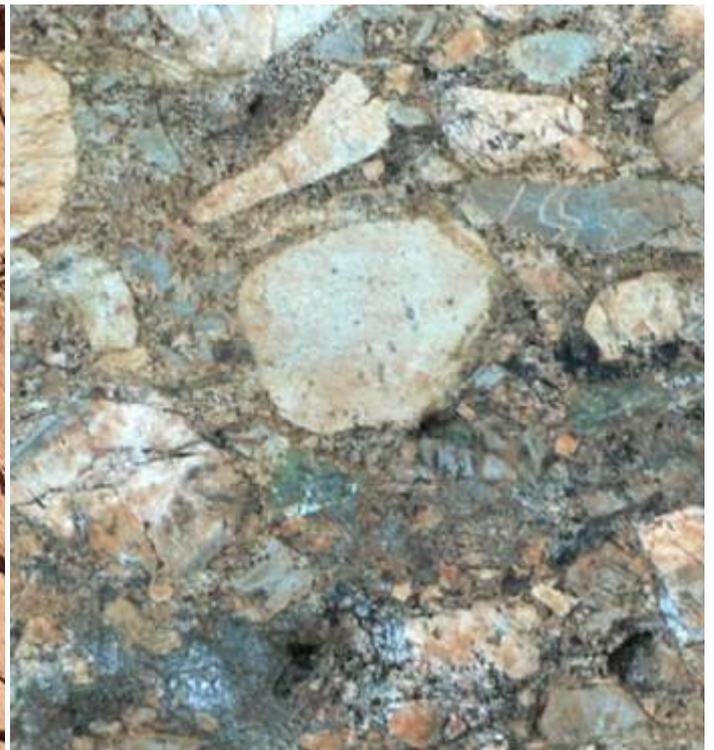
Pillow lava daté de 3.865 Ga (Barbeton, Afrique du sud)



Rides de plage datées de 3.5 Ga (NorthPole, Australie)



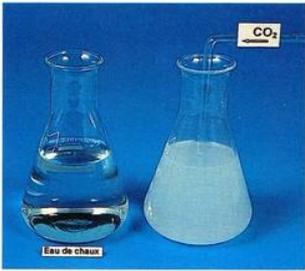
Fentes de dessiccation datées de 3.5 Ga (Barbeton, Afrique du sud)



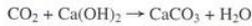
Conglomérat à galets datés de 3.5 Ga (Barbeton, Afrique du sud)

Source : <http://bibliotheque.clermont-universite.fr/sites/files/portail/documents/mercrediscience/Martin.pdf>

→ Pb : Quel lien entre la présence d'eau liquide et l'évolution du taux de CO<sub>2</sub> ?



Faisons barboter du CO<sub>2</sub> dans de l'eau de chaux, Ca(OH)<sub>2</sub> : il se forme un précipité de carbonate de calcium, CaCO<sub>3</sub>, insoluble.



Quand elle se déroule dans des eaux marines, ou lacustres, riches en ions Ca<sup>2+</sup>, cette réaction est à l'origine de la formation des calcaires. Le CO<sub>2</sub> est alors piégé sous forme de carbonate.



Dans ce même erlenmeyer, on souffle plusieurs fois. Le CO<sub>2</sub> contenu dans l'air expiré va alors réagir avec le CaCO<sub>3</sub> formé précédemment.

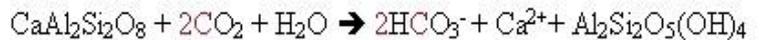


Il se forme des ions hydrogencarbonate solubles, le CaCO<sub>3</sub> a donc été dissous.

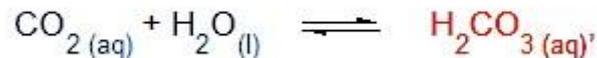
Dans la nature, un calcaire peut être dissous par une eau riche en CO<sub>2</sub> dissous.



Zoom sur le granite de Domfront, très altéré ("pourri") au niveau des diaclases. Le résultat de l'altération est appelé arène granitique. Sa couleur brun sale est due aux argiles et oxydes néoformés par hydrolyse des micas et des feldspaths. Cette réaction consomme du CO<sub>2</sub> comme le montre la réaction bilan ci-dessous pour l'hydrolyse d'un feldspath calcique :



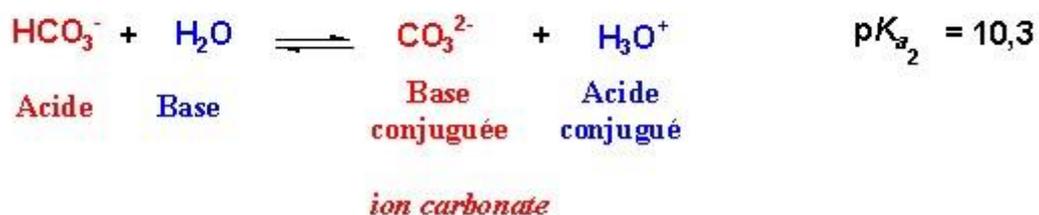
La vapeur d'eau s'est très tôt condensée pour former les océans qui ont piégé le CO<sub>2</sub> issu du dégazage volcanique par dissolution selon la réaction :



Le CO<sub>2</sub> participant (avec la vapeur d'eau) à l'effet de serre, son stockage dans les océans a contribué à abaisser la température sur la planète ce qui explique les traces des premières glaciations il y a 2.5 Ga.

Plus tard, d'autres processus ont participé à la chute du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, en particulier l'altération chimique des roches (cf réactions plus haut)

Remarque : en solution aqueuse, l'acide carbonique H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> est un diacide, c'est-à-dire qu'il peut se dissocier deux fois de suite dans l'eau en libérant chaque fois un proton sous forme de cation H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> :



## II- Les témoins sédimentaires de l'arrivée de dioxygène dans l'atmosphère

### 1- Les gisements de "fers rubanés"

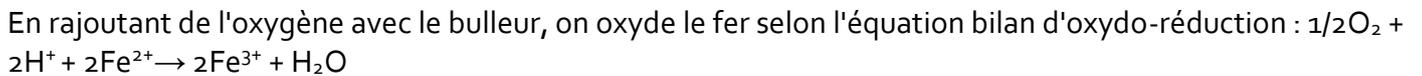
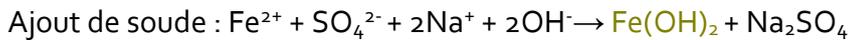


Fer rubané (BIF=Banded Iron Formations) Précambrien, environ -2,1 milliards d'années,

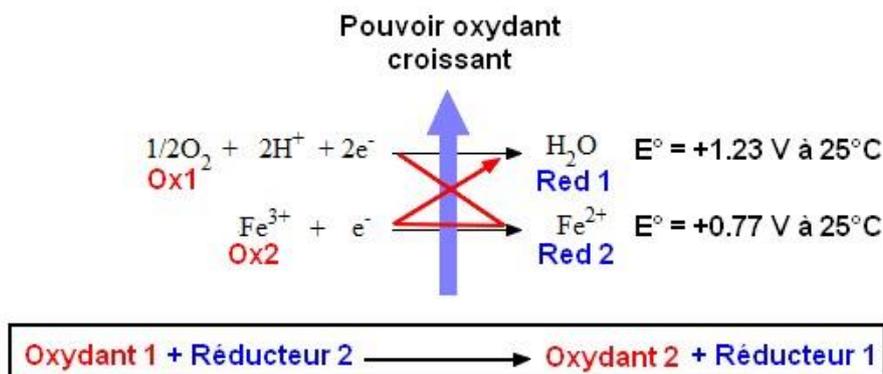
Source : [http://www.museum-lyon.org/expo\\_temporaires/lectures\\_minerales/lectures\\_minerales\\_accueil.htm](http://www.museum-lyon.org/expo_temporaires/lectures_minerales/lectures_minerales_accueil.htm)

Les couches rouges sont constituées d'oxydes de fer. Elles alternent avec des couches plus sombres siliceuses.

Expérience pour comprendre les conditions nécessaires à la formation de fer oxydé:



Rappel de chimie sur la règle du gamma appliquée aux couples red-ox ( $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ ) et ( $\text{H}_2\text{O} / \text{O}_2$ )



Avec les OH<sup>-</sup> de la soude :  $\text{Fe}^{3+} + 3(\text{OH}^-) \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$

→ Les fers rubanés montrent que le dioxygène produit sur Terre à partir de -4 Ga a d'abord été piégé dans les océans avant d'être rejeté dans l'atmosphère.

## 2- Les gisements d'uranium

### Ezulwini Uranium and Gold Mine, Gauteng, South Africa



The project lies within the Witwatersrand Basin, an Archean (about 2.7 billion years-old) sedimentary basin that contains a stratigraphic sequence about 6km thick.

### Source

"De 4,5 à 2 milliards d'années, des gisements d'uraninite détritique se forment, en milieu anoxique. À partir de 2 milliards d'années, l'atmosphère s'enrichit en dioxygène. Les gisements d'uranium sédimentaire ne sont alors plus formés d'UO<sub>2</sub> détritique, qui s'oxyde en UO<sub>3</sub>, mais de complexes uranifères associés à de la matière organique. Ces complexes sont issus de la réduction de l'UO<sub>3</sub> en présence de matière organique." d'après Pierre Thomas Laboratoire des Sciences de la Terre, Ens Lyon

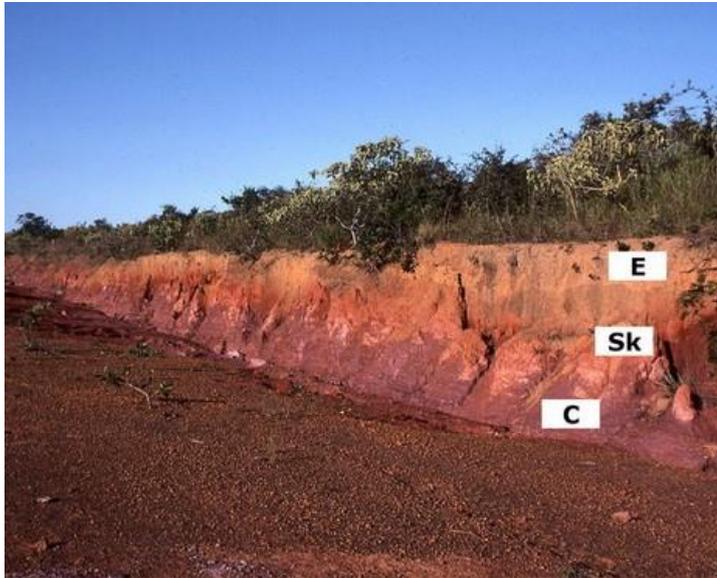
Source : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-uraninite.xml>

La France exploite des gisement moins anciens dans des bassins qui ont permis la réduction de l'UO<sub>3</sub> :



Les gisements d'uranium sédimentaire sont très nombreux de -3.5 à -2.2 Ga car à cette époque l'uraninite pouvait précipiter dans des eaux de surface peu oxygénée. Après 2.2 Ga, ils sont moins nombreux car l'atmosphère et donc les eaux de surface sont devenues plus riches en dioxygène ce qui a favorisé la solubilisation de l'uraninite.

### 3- L'étude des paléosols



Strates de grès rouges de la Blyde river en Afrique du sud (âge : -2.2 Ga)

Sol actuel sous climat tropical subhumide

Couvert végétal : savane arborée (cerrado). Hauteur de la coupe : 200 cm.

Le sol est relativement peu épais. On distingue un horizon clair, lessivé (E), un horizon jaune-rouge, à structure pédologique (Sk) un horizon rouge violet, à structure lithologique (C = schistes). Le sol est très différencié, lessivé.

Source : <http://photos.afes.fr/picture.php?/7>

A partir de 2.2 Ga, les dépôts fluviaux sont riches en hydroxydes de fer. Les sols de l'époque (paléosols) devaient ressembler aux sols tropicaux actuels : les latérites.

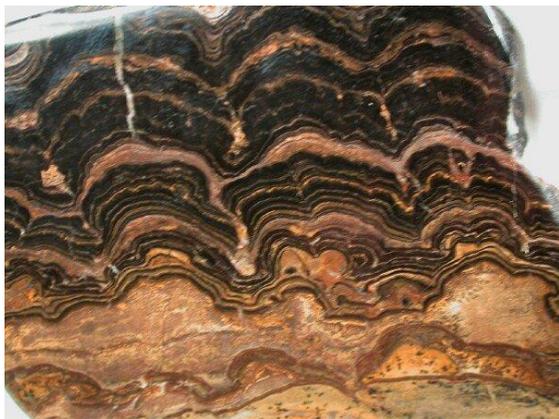
Photo : <http://www.geo.fr/dossier-geo/voyage-en-afrique-du-sud-62592>

→ Les paléosols rouges confirment que l'atmosphère est devenue oxydante à partir de 2.2 Ga.

Pb : Quelle est l'origine du dioxygène atmosphérique ?

## III- Atmosphère et développement de la vie

### 1- Un dioxygène d'origine biologique



Stromatolithe de la « réserve de Mortain ».



Stromatolithes, à marée basse, sur le littoral de l'Ouest de l'Australie, dans le parc national de Yalgorup

[Source](#) : C Eeckhout



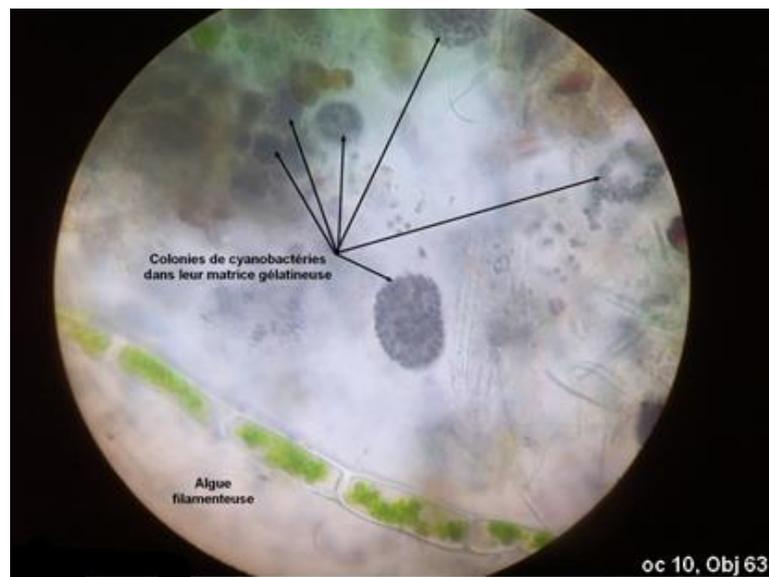
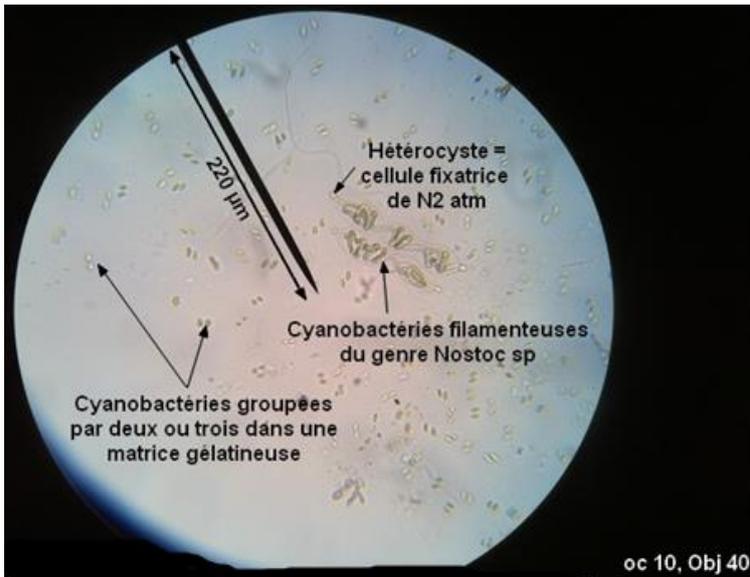
Bloc erratique provenant du Nord du Québec. Hauteur: 60 cm.



Coupe dans un stromatolithe de Rhynie

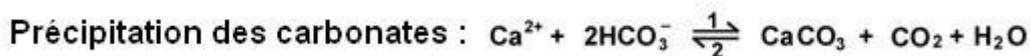
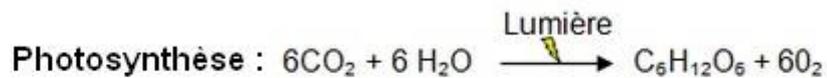
On observe une alternance de niveaux de calcite (niveaux blancs, l'essentiel de la photo) avec des petits niveaux à reliques de matière organique (niveaux noirs, indiqués par (b) )

Les stromatolithes sont des constructions fossiles, formées de carbonates. Ce sont parmi les plus anciens fossiles connus, et certainement les plus anciens macrofossiles ; on en connaît depuis 3,5 Ga (en Australie). Ils sont formés en général par des cyanobactéries (« algues bleues ») photosynthétiques, qui existent encore à l'heure actuelle.



Cyanobactéries du genre *Coelomorion* sp (à vérifier) et *Nostoc* sp trouvées dans un « jardin »

Cyanobactéries du genre *Microcystis* sp trouvées dans les sédiments de l'aquarium sale

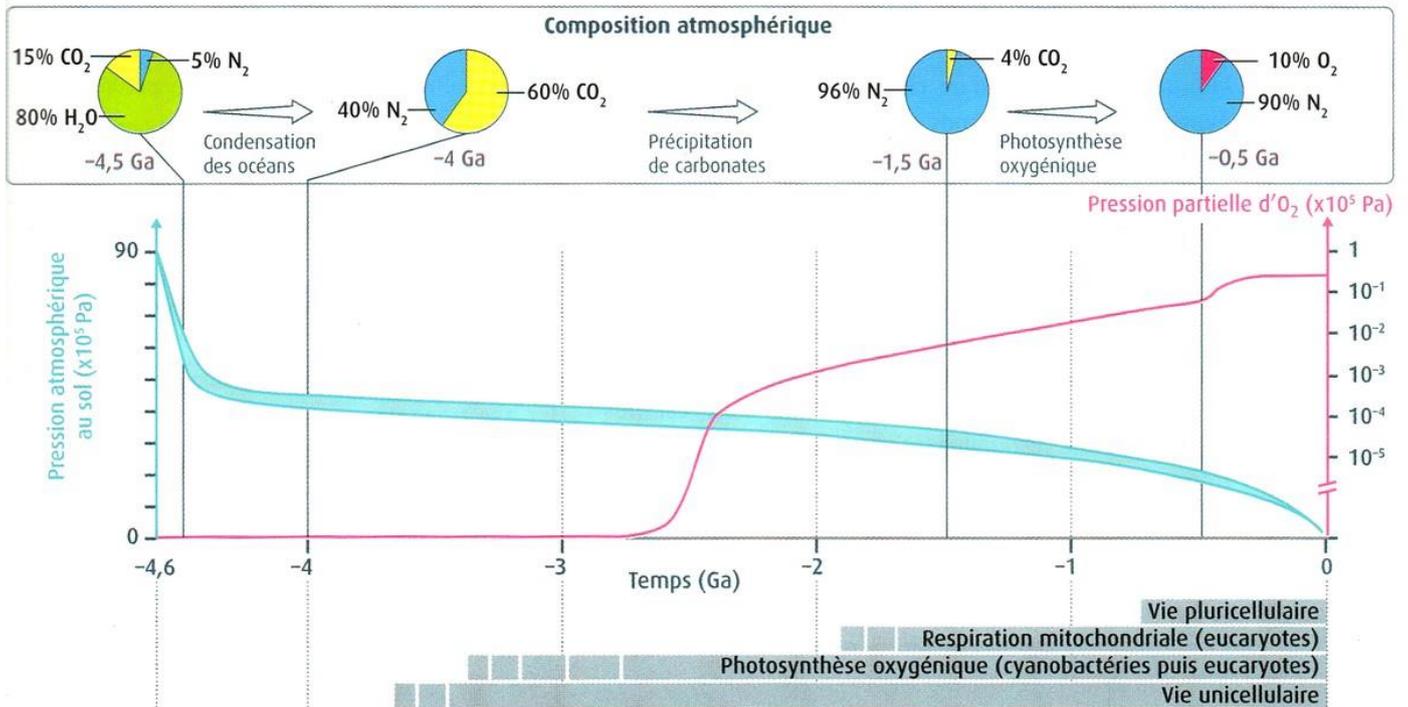


Dans un système où des ions carbonates (ou hydrogénocarbonates) existent en solution, on voit donc que, si on soustrait du CO<sub>2</sub> au système, l'équation des carbonates est déplacée vers la droite, c'est à dire vers la précipitation de carbonates. La photosynthèse consomme du CO<sub>2</sub>, si bien qu'elle induit localement la précipitation de carbonates.

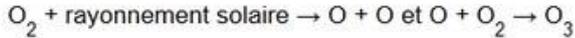
Source : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadate/LOM-stromatolithes.xml>

→ Les premiers producteurs de dioxygène sont probablement des procaryotes, proches des cyanobactéries actuelles, qui édifiaient des constructions calcaires "en chou fleur" : les stromatolites dont les plus anciens sont datés autour de -3,5 Ga. Ces cyanobactéries consomment du CO<sub>2</sub> et libèrent du dioxygène par photosynthèse.

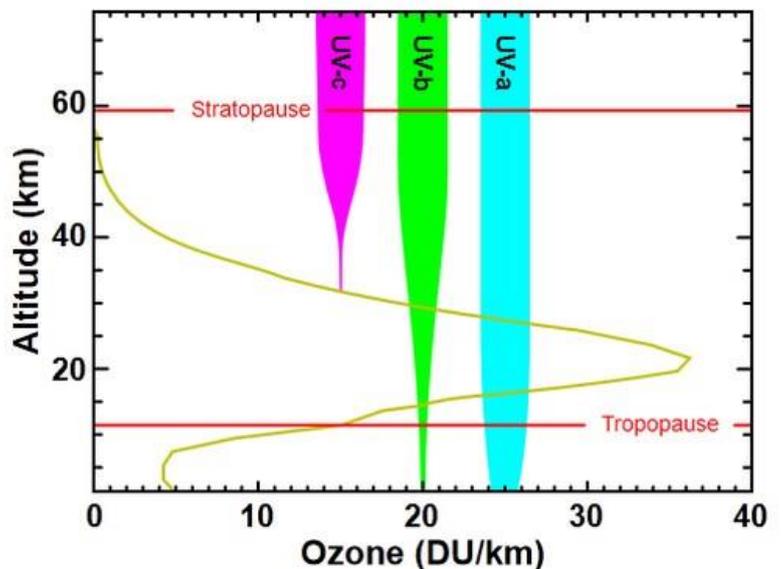
## 2- Impact de l'évolution de l'atmosphère sur la vie



L'ozone est produit à partir du dioxygène, composé de deux atomes d'oxygène (O<sub>2</sub>). Aux altitudes supérieures à 30 km, le rayonnement solaire possède encore une énergie suffisante pour casser une partie des molécules de dioxygène et libérer les atomes. Un atome d'oxygène tendant à ne pas rester seul pour des raisons de stabilité, doit se recombinaison à un autre élément ; il interagit donc avec une autre molécule de dioxygène (O<sub>2</sub>) présente pour former une nouvelle molécule, composée de trois atomes d'oxygène : l'ozone (O<sub>3</sub>).



Cette réaction chimique est la seule qui, dans la stratosphère, produit de l'ozone. Mais puisque tout l'oxygène n'est pas transformé en ozone dans ce processus, il existe donc un facteur limitant sa concentration. Primitivement, une certaine quantité d'ozone est apparue, il y a plus de 2 milliards d'années, lorsque l'oxygène est devenu permanent avec une concentration de l'ordre du pourcent. La concentration observée aujourd'hui résulte d'un équilibre entre la production d'ozone par le rayonnement solaire, et certains processus de destruction : tout l'ozone produit en « trop plein du réservoir » est détruit. C'est ce que l'on appelle un équilibre dynamique.



→ La production de dioxygène a, dans un premier temps, causé des extinctions massives chez les bactéries anaérobies mais elle a ensuite permis d'accélérer l'évolution des espèces grâce à l'apparition de la respiration. Plus tard, elle a permis la conquête des milieux continentaux par la mise en place de la couche d'ozone.