Chapitre 3 : L'atmosphère primitive et son évolution

Introduction :

La Terre s'est formée il y a 4,5 Ga par accrétion d'objets cosmiques plus ou moins massifs. Une planète en fusion s'est peu à peu structurée, la Terre s'est différenciée, les éléments se sont répartis en fonction de leur densité, les plus lourds migrant vers le centre de la Terre, les plus légers vers la périphérie. Des enveloppes concentriques se sont ainsi mises en place : noyau, manteau, croute, hydrosphère, atmosphère.
L'atmosphère terrestre est ainsi formée des éléments les moins denses que la Terre a pu retenir du fait de sa masse et de sa distance au soleil.

Objectif du chapitre : On cherche à savoir qu'elle était la composition initiale de l'atmosphère de la Terre et comment elle a évolué pour devenir ce qu'elle est aujourd'hui.

I. Une atmosphère primitive bien différente de l'actuelle

A. Une atmosphère formée par dégazage du manteau

Les gaz rares de l'atmosphère fournissent des informations sur l'origine de l'atmosphère primitive.
L'hélium est un gaz très peu dense qui s'échappe facilement de l'atmosphère vers l'espace. Il est pourtant présent dans l'air ce qui indique qu'il est renouvelé en permanence. La teneur maximale d'hélium se situe au-dessus des dorsales océaniques, donc l'activité volcanique libère de l'hélium qui provient du dégazage continu du manteau.
L'étude des gaz rare nous indique donc que l'atmosphère terrestre s'est formée par un dégazage intense et précoce du manteau (probablement dans les cent premiers millions d'années qui ont suivi l'accrétion terrestre). Ce dégazage s'est poursuivi par la suite mais d'une manière lente et continue.
On pense que les météorites de type chondrite sont représentatives de la composition moyenne de la Terre primitive. L'analyse de la composition des gaz chondritiques nous permet donc d'avoir une idée de la composition de l'atmosphère primitive.
On peut donc penser que l'atmosphère initiale était riche en eau, dioxyde de carbone, en diazote mais qu'elle était dépourvue de dioxygène.
L'atmosphère primitive provenant du dégazage du manteau, les gaz volcaniques actuels, produits par le dégazage du manteau représentent une source d'information.
Leur composition varie en fonction du type d'éruption mais l'eau prédomine toujours, il contient dioxyde de carbone, du diazote, du dioxyde de soufre mais pas de dioxygène.
L'étude des météorites et des gaz volcaniques nous fournissent donc des informations sur la composition de l'atmosphère primitive.

B. Evolution rapide de l'atmosphère primitive au début de son histoire

La température ambiante diminuant après la phase d'accrétion terrestre, on pense qu'une partie de la vapeur d'eau s'est condensé. Cette eau liquide s'est mêlée à celle apportée par les météorites et les comètes pour former les premiers océans.
Le piégeage du CO_2 atmosphérique a pu alors débuter, le CO2 gazeux à diffuser dans l'hydrosphère. Ce phénomène est devenu considérable avec la formation des roches sédimentaires carbonatées.
Ainsi, la concentration du CO_2 atmosphérique a diminué, de 10000 fois la quantité actuelle il y a 4,5 Ga, son taux n'est plus que de 5 à 15 fois la quantité actuelle il y a 600Ma.

II. Le passage de l'atmosphère primitive réductrice à l'atmosphère oxydante

A. Des témoins sédimentaires de l'arrivée de dioxygène dans l'atmosphère

L'atmosphère initiale était réductrice, car privée de dioxygène, ce gaz représente 21 % de l'atmosphère actuelle.

Certaines formations sédimentaires permettent de fixer aux environ de - 2,2 Ga l'apparition de l'atmosphère oxydante.
Les principales réserves mondiales de fer sont des roches sédimentaires d'origine océanique. Ces gisements de fer, associés à des précipitations siliceuses, sont qualifiés de « fers rubanés » (ou BIF = Banded Iron Formation) et sont datés de -3,5 à -2,2 Ga. Ces énormes quantités de fer et de silice ont été apportées par des eaux douces continentales avant de précipités en milieu océanique.
Or, le fer est soluble dans les eaux désoxygénées, il précipite en hydroxyde ferrique quand les eaux sont chargées de dioxygène.
L'information apportée par l'existence des fers rubanés est donc double. Ils indiquent qu'avant -2,2 Ga :

- il n'y a pas de dioxygène dans l'atmosphère (car sinon le fer ne pourrait pas être transporté par les eaux douces).
- il y a en revanche du dioxygène dans les océans (sinon il n'y aurait pas de précipitation).

L'absence de fer rubanés après -2,2 Ga révèle un changement complet : le fer n'est plus transporté dans les océans parce qu'il précipite en milieu continentale : l'atmosphère est donc devenue oxydante.
Avant -2,2 Ga, les paléosols montrent des appauvrissements en fer qui traduisent un entrainement du fer dissous par les eaux.
En revanche après -2,2 Ga, les paléosols sont riches en hydroxyde ferrique qui leur confère une couleur rouge : on parle des couches rouges ou « red beds ». Le fer a donc précipité sur place sans être transporté.
L'atmosphère contient donc bien du dioxygène à partir de cette date.
L'ensemble de « ce témoignages sédimentaires » permettent donc d'affirmer que, si du dioxygène a été produit sur Terre à partir de -3,5 Ga (début de la formation des fers rubané), ce gaz n'est apparu de façon significative dans l'atmosphère que beaucoup plus tard, il a d'abord été piégé dans les formations sédimentaires océaniques.
Ce n'est donc qu'à partir de -2,2 Ga que l'atmosphère devient oxydante (couche rouge montant que le fer précipite désormais en milieu continentale).

B. L'évolution de l'atmosphère est liée à celle de la vie

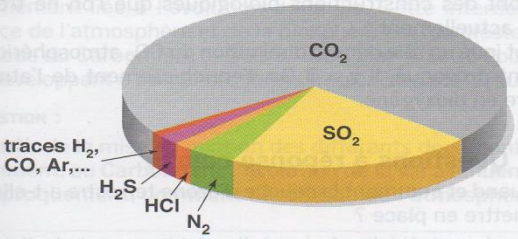
Des fossiles très anciens, les stromatolites suggèrent que vers -3,5 Ga, des êtres vivants procaryotes, proches des cyanobactéries actuelles, étaient présents sur Terre.
Ces êtres vivants étaient capables de réaliser la photosynthèse. Les bactéries fossilisées pourraient donc être les premiers producteurs de dioxygène.
La vie est donc à l'origine d'une modification majeur de l'atmosphère terrestre.

Bilan :

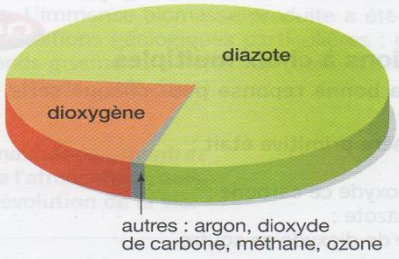
L'atmosphère terrestre s'est formée par un dégazage intense du manteau terrestre.
L'analyse des émissions volcaniques, signatures du dégazage mantellique, mais aussi l'analyse du dégazage des chondrites permettent d'imagier la composition de l'atmosphère primitive. Elle devait être réductrice (sans dioxygène), riche en dioxyde de carbone, dioxyde de soufre, diazote et en eau.
De -3,5 à -2,2 Ga, des formations sédimentaires contenant du fer précipitent en milieu océanique (fers rubanés). Après - 2,2 Ga les gisements de fer sont continentaux (paléosols rouges). Du dioxygène a donc été produit sur Terre à partir de – 3,5 Ga. Ce dioxygène a d'abord été piégé dans les océans, ce n'est qu'à partir de -2,2 Ga qu'il apparait dans l'atmosphère.
Les premiers producteurs de dioxygène sont probablement des procaryotes, proches des cyanobactéries actuelles qui ont libéraient du dioxygène par photosynthèse.

Une atmosphère primitive très différente de l'atmosphère actuelle

- **Atmosphère primitive**



- **Atmosphère actuelle**



- **Une chute rapide du taux de CO_2 atmosphérique**

Un CO_2 en grande partie piégé sous forme de carbonates dans les océans.

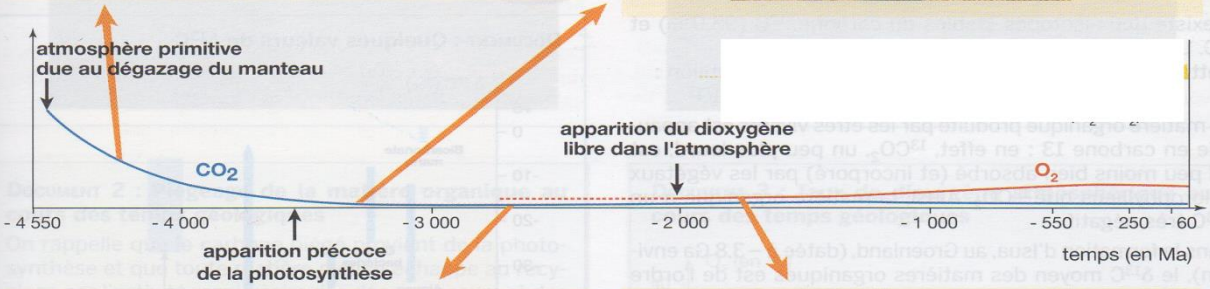
$$CO_{2\,aq} + 2\,H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H_3O^+$$

$$HCO_3^- + H_2O \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H_3O^+$$

Les carbonates précipitent et forment des roches sédimentaires d'où un piégeage à long terme du CO_2.

- **Une libération de dioxygène en milieu marin**

Des cyanobactéries photosynthétiques (à l'origine des stromatolites) libèrent du dioxygène.

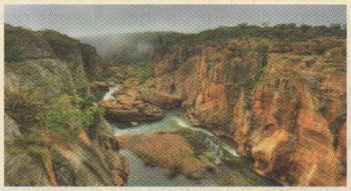


- **Un piégeage du dioxygène dans les sédiments**

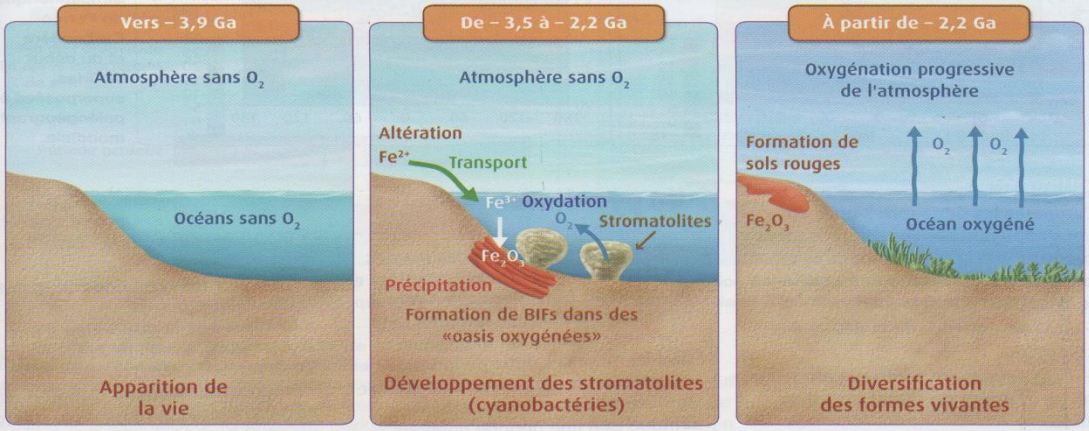
Fers rubanés, témoins de la présence de dioxygène dans l'eau des océans

Tant que l'eau des océans contient du fer ferreux, celui-ci est oxydé en fer ferrique qui forme les couches rouges de « fers rubanés » dans les sédiments.

- **Une libération de dioxygène dans l'atmosphère**



Paléosols rouges, témoins d'une atmosphère oxydante

Quand il n'y a plus eu de fer ferreux dans les océans, le dioxygène a diffusé dans l'atmosphère : celle-ci, devenue oxydante, a contribué à l'explosion de la vie.

Le développement de la vie et la transformation de l'atmosphère