

L'atmosphère terrestre : son rôle dans l'apparition et dans le maintien de la vie

Introduction :

La Terre est la seule planète de notre système solaire à avoir une atmosphère permettant la vie. Mais la « planète bleue » (la Terre est recouverte à 75 % par des océans) n'a pas toujours mérité son surnom et l'atmosphère terrestre qui nous paraît si évidente est le résultat d'un long processus.

La formation de la Terre résulte d'un long processus d'accrétion de matière (c'est-à-dire d'agglomération de la matière) et d'une différenciation progressive des différentes couches selon leur densité. L'atmosphère, quant à elle, a évolué au cours de milliards d'années en lien avec des processus géologiques et biologiques.

Nous allons étudier la composition primitive de l'atmosphère terrestre puis son évolution, concomitante avec l'apparition de la vie sur Terre.

1 | La formation de l'atmosphère et son évolution

a. De la composition de l'atmosphère et formation de l'hydrosphère

La Terre s'est formée, il y a environ 4,5 milliards d'années (ou 4,5 Ga). Son **atmosphère**, c'est-à-dire la couche d'air qui l'enveloppe, est apparue il y a à peu près 4,4 milliards d'années sous l'action conjuguée du **dégazage des roches du manteau** par l'activité volcanique, et des impacts des **météorites**. Ces deux phénomènes ont déterminé la composition de l'**atmosphère primitive**.



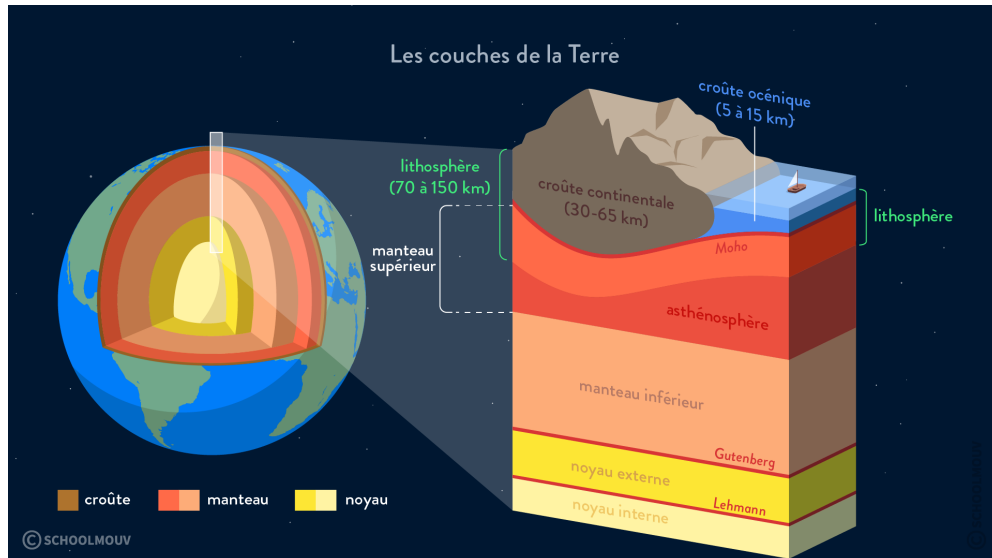
Définition

Atmosphère primitive :

Première atmosphère de la Terre formée il y a 4,4 milliards d'années.



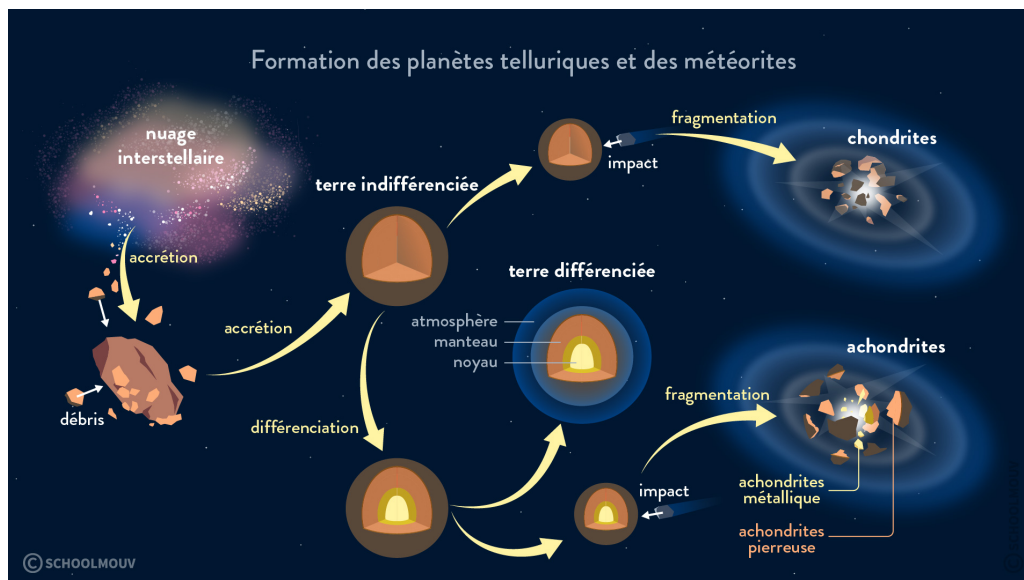
Le manteau correspond aux couches supérieures de la Terre.



Le dégazage des roches du manteau désigne donc l'expulsion des gaz accumulés dans ces roches souterraines vers l'extérieur, grâce à l'activité volcanique.

Ce dégazage a pu être mis en évidence par l'étude des **chondrites** (météorites).

En laboratoire, elles ont été chauffées à des températures similaires à celles sur Terre à cette époque, afin d'analyser les gaz en sortant. Par ce processus, les scientifiques ont reproduit ce qui a eu lieu il y a 4,4 milliards d'années.



Aujourd'hui, notre atmosphère se compose à 78 % de diazote, 21 % de dioxygène et 1 % d'autres gaz (argon, dioxyde de carbone, méthane, etc.).



La composition de l'**atmosphère primitive** n'est pas la même qu'aujourd'hui : elle est très riche en **eau** (80 %), en **dioxyde de carbone** (environ 15 %) et contient du **diazote** en quantité moindre (< 5 %). Le dioxygène n'est pas présent initialement : il apparaît uniquement sous forme de traces.

De plus, l'eau et le dioxyde de carbone sont des gaz à effet de serre contribuant à une température très élevée à la surface de la Terre primitive.

Gaz	Atmosphère primitive	Atmosphère actuelle
Vapeur d'eau (H_2O)	80 %	0,1 %*
Dioxyde de carbone (CO_2)	15 %	< 0,1 %

Diazote (N_2)	< 5 %	78 %
Dioxygène (O_2)	absent (traces)	21 %

* C'est une moyenne : dans certaines régions tropicales, la proportion de H_2O peut atteindre 5 %.

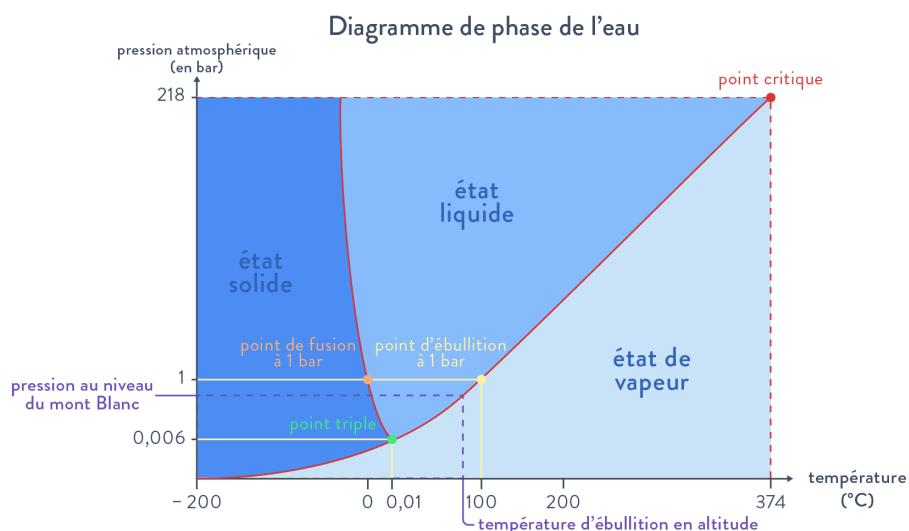


L'eau présente dans l'atmosphère est majoritairement sous forme gazeuse (sauf quand il pleut). Comment l'expliquer ? Par un **diagramme de phase**.

L'eau existe sous trois états physiques différents : solide, liquide et gazeux (vapeur).

L'état physique de l'eau dépend de deux paramètres : la pression et la température.

Le diagramme de phase nous permet de lire ce lien :



→ Avec une pression atmosphérique de **1 bar** (pression standard), nous savons et constatons sur le graphique que l'eau gèle à **0 °C** (solide) et qu'elle bout à **100 °C** (vapeur).

Pourtant, si vous allez en montagne et que vous cuisinez, vous constaterez que la température d'ébullition est plus basse, car la pression en altitude est plus faible.

Pourquoi ne trouvons-nous pas d'eau liquide à la surface de Mars ? Parce que, sur Mars, la pression atmosphérique est de **0,0059 bar**. À cette pression, quelle que soit la température que vous choisissiez, l'eau ne sera jamais à l'état liquide, mais uniquement sous forme solide ou sous forme de vapeur !

Lorsque la Terre a commencé à se refroidir, l'eau sous forme de vapeur s'est condensée. Selon les hypothèses scientifiques, cette eau provient pour moitié des météorites et pour moitié du dégazage du manteau. On estime qu'il a fallu environ 150 millions d'années pour former les **océans**.



C'est donc par le refroidissement de la surface terrestre que l'eau présente en très grande quantité dans l'atmosphère primitive a commencé à se liquéfier pour former l'**hydrosphère**.



Hydrosphère :

L'hydrosphère désigne l'ensemble des zones de la Terre qui sont occupées par l'eau, que ce soit sous sa forme liquide (océans, cours d'eau, lacs...), solide (glaciers, neiges éternelles...) ou encore gazeuse (vapeur d'eau). La majeure partie de l'hydrosphère est constituée par les eaux salées (mers et océans).



L'émergence de la vie et l'oxygénation de l'atmosphère

Les traces de vie les plus anciennes sont des **stromatolithes**. Les stromatolithes sont formés par les **cyanobactéries**. Elles sont apparues vers **—3,5 Ga**, avec une très forte présence entre **—2 Ga** et **—1 Ga** partout dans les océans du globe.

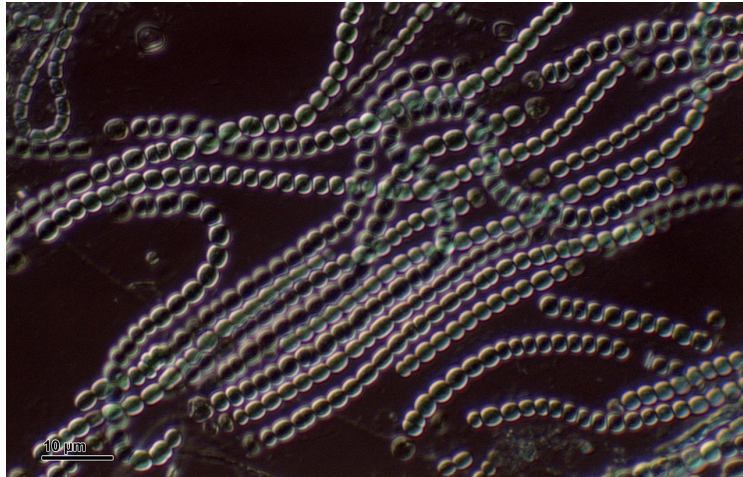
Actuellement, quelques stromatolithes en formation sont visibles en Australie par exemple.



Définition

Cyanobactérie :

Bactéries photosynthétiques aquatiques.



Définition

Stromatolithe :

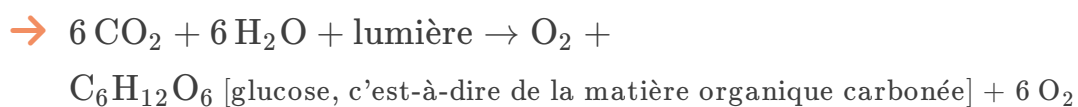
Accumulation de lits calcaires et de petits débris rocheux dans lesquels s'entremêlent des filaments de cyanobactéries.

Ils sont le produit visible de la présence de cyanobactéries.



Les cyanobactéries réalisent la **photosynthèse**. C'est-à-dire qu'elle absorbe le dioxyde de carbone (CO_2) dissous dans l'océan et dégagent un nouvel élément essentiel : du **dioxygène** (O_2).

La photosynthèse s'écrit ainsi :



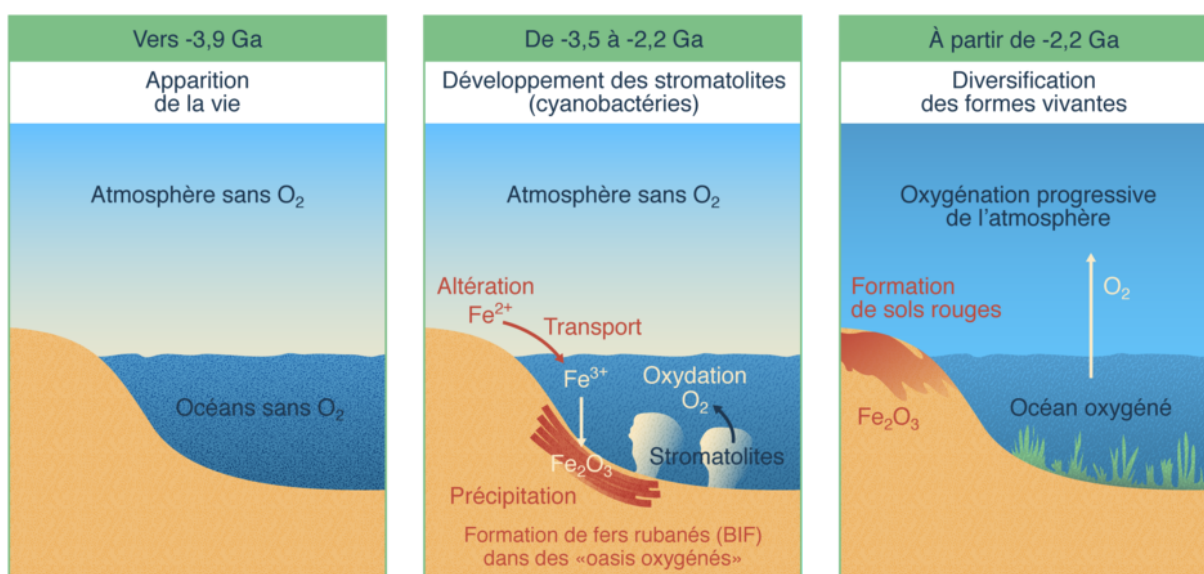
L'absorption du dioxyde de carbone s'accompagne de la précipitation de calcaire (CaCO_3) à partir des ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et calcium (Ca^{2+}) selon l'équation chimique : $2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Cela explique l'organisation des stromatolithes en couches concentriques de calcaire et de cyanobactéries.

Le dégagement de dioxygène va enrichir localement l'océan, le rendant oxydant. Les ions ferriques Fe^{2+} issus de l'altération des roches continentales, du volcanisme et de l'activité hydrothermale (sources et circulation d'eau chaude au fond des océans) vont réagir au contact du dioxygène (oxydation pour donner des ions ferriques Fe^{3+}) et finalement donner de l'**oxyde de fer** (Fe_2O_3). Ce processus est visible dans des roches sédimentaires riches en fer, appelées **BIF (formations de fer rubané)**. Leur formation a eu lieu entre $-3,5 \text{ Ga}$ et $-2,2 \text{ Ga}$.



BIF (*Banded Iron Formation*) :

Les BIF(ou gisement de fers rubanés) sont des roches alternant des couches riches en fer oxydé et des couches de silice.

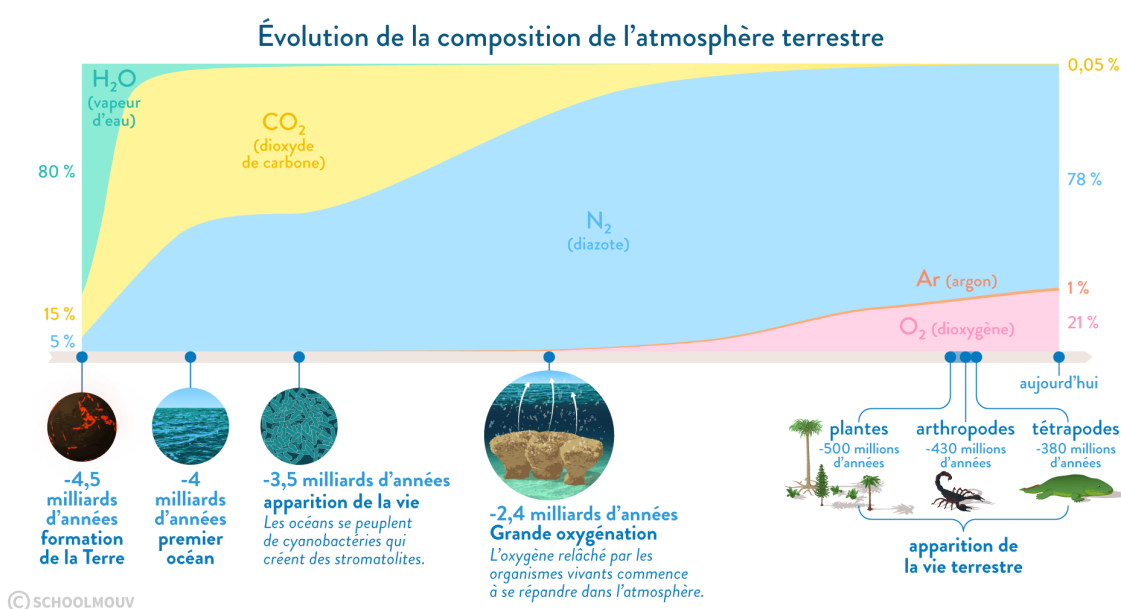


- 1 Sur les continents, l'érosion de roches en milieu réducteur entraîne les ions ferreux solubles (Fe^{2+}) vers les océans.
- 2 En contact avec l'oxygène des océans, les ions Fe^{2+} s'oxydent en ions Fe^{3+} . Par la suite, ils vont précipiter selon la formule $Fe^{2+} + O_2 \rightarrow Fe_2O_3$ et on obtient ces BIF de couleur rouge caractéristique.

- 3 À partir de -2,2 milliards d'années, après saturation de l'hydrosphère en dioxygène grâce à l'action des cyanobactéries, il y a une oxygénation progressive de l'atmosphère. Il y a alors formation de sols rouges en domaine continental. En effet, les ions Fe^{2+} libérés peuvent être oxydés avant d'arriver dans les océans, car l'atmosphère est alors oxydante.



À partir de $-2,2 \text{ Ga}$, l'excès de dioxygène produit par les cyanobactéries a oxygéné les océans puis l'atmosphère ($-2,4 \text{ Ga}$). La concentration atmosphérique en dioxygène actuelle a été atteinte il y a 500 millions d'années environ.



→ Comme on peut le voir sur cette image, l'évolution de la composition de l'atmosphère se fait donc en lien étroit avec le refroidissement terrestre qui permet la formation de l'hydrosphère, puis l'apparition de la vie et de l'activité photosynthétique des cyanobactéries.

c. Explosion de la biodiversité marine

Dans un laps de temps d'environ 20 à 50 millions d'années, on assiste à une augmentation très forte du nombre d'espèces marines à travers le monde.

On parle d'**explosion cambrienne**, entre la fin du protérozoïque et le cambrien.



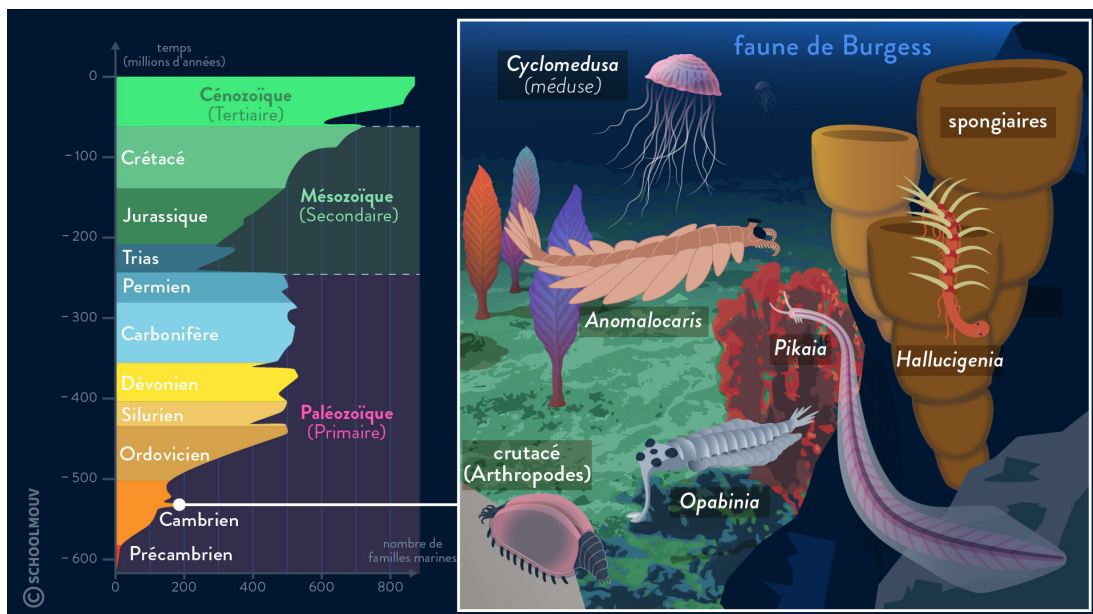
Explosion cambrienne :

L'explosion cambrienne désigne l'apparition relativement soudaine de nombreux organismes marins pluricellulaires il y a environ 540 millions d'années.

Cette explosion de la vie mène à une diversification des espèces, qu'il s'agisse de bactéries, de végétaux ou d'animaux.

Un des exemples emblématiques de cette période est la **faune de Burgess**, gisement de fossiles à l'ouest du Canada. On y trouve principalement des fossiles d'animaux appartenant à la famille des arthropodes, qui possèdent un squelette externe (carapace rigide), comme les trilobites, et à la famille des cnidaires (méduses). Mais de nombreuses espèces appartiennent à des familles aujourd'hui disparues.

→ Une des explications à ce fort développement de la faune est l'oxygénation des océans.



La complexification des organismes s'est potentiellement accompagnée d'une diversification des physiologies photosynthétique et respiratoire.

→ Il existe ainsi un **lien étroit entre biosphère et atmosphère** : la présence et les variations de dioxygène atmosphérique sont liées aux activités métaboliques des êtres vivants (photosynthèse puis la respiration).

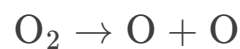
2 | Formation de la couche d'ozone et impact sur l'émergence de la vie

a. Formation de la couche d'ozone



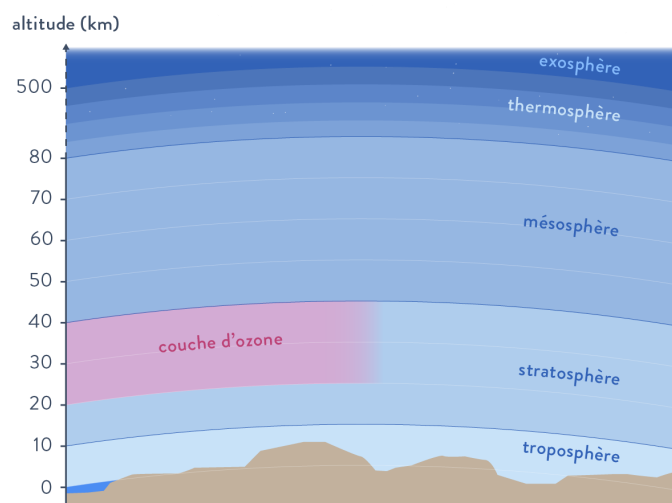
Dans l'atmosphère, la **couche d'ozone** se trouve dans la stratosphère. Elle désigne une zone très riche en ozone (O₃) et qui permet l'**absorption de rayons ultraviolets** provenant du Soleil.

On estime à 600 millions d'années l'apparition de cette couche riche en ozone. En effet, sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, le dioxygène atmosphérique peut se dissocier et donner de l'ozone selon les réactions chimiques successives :



Cet ozone s'accumule alors à environ **30 km** d'altitude, au niveau de la stratosphère.

Organisation des couches de l'atmosphère et localisation de la couche d'ozone



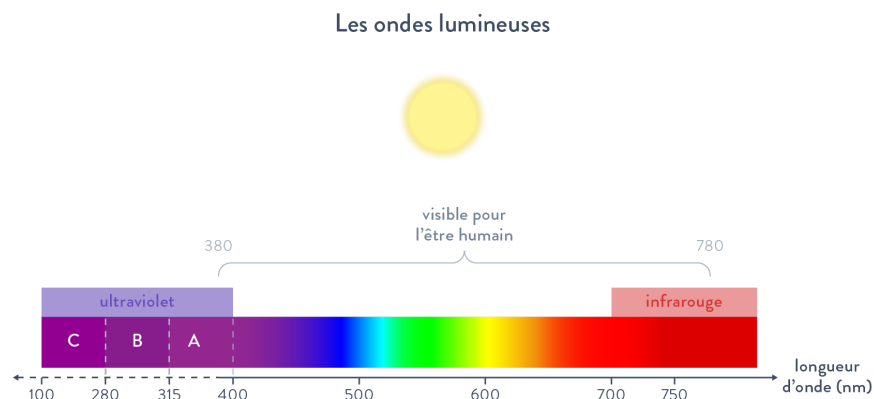
© SCHOOLMOUV

b. Effet bénéfique de l'ozone sur la vie

L'ozone a pour particularité d'absorber une partie du rayonnement ultraviolet solaire.



La lumière du Soleil se compose de rayons ultraviolets (UV), de la lumière visible pour les humains et de rayons infrarouges (IR).

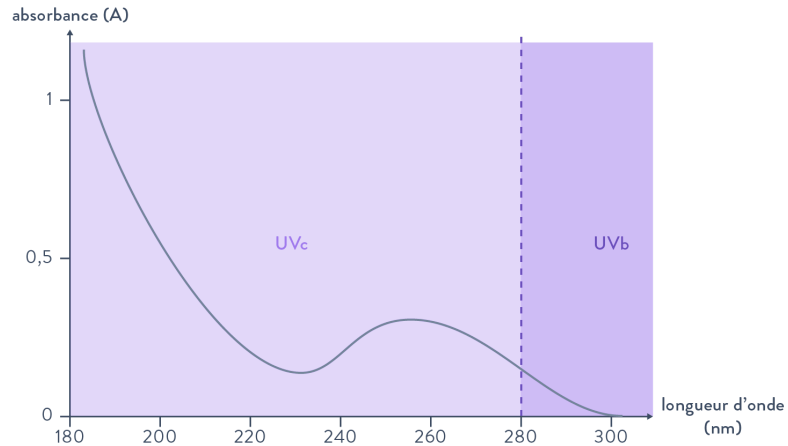


Les UV sont répartis en trois catégories : **Uva**, **UVb** et **Uvc**. Plus la longueur d'onde des UV est courte, plus la quantité d'énergie est importante, mais moins elle pénètre le milieu. Les Uvc, qui ont une longueur d'onde plus courte, sont donc les UV les plus dangereux (mais les moins pénétrants).

→ L'ozone absorbe donc les rayons Uvc et une grande partie des UVb, tandis que les Uva et environ 5 % des UVb atteignent la surface de la Terre.

Avant l'apparition de la couche d'ozone, la Terre était donc complètement exposée aux rayons ultraviolets, notamment aux Uvc, qui bombardaient sa surface. La toxicité de ces Uvc est si importante que la vie en dehors des océans était impossible (l'eau permet de bloquer les Uvc).

Spectre d'absorption de l'ADN d'*E. Coli* à 25 °C



→ L'ADN absorbe principalement les longueurs d'ondes des UVc et le début des UVb.

Cette absorption d'UV a pour conséquence une dénaturation ou une **mutation** de la molécule d'ADN.

En effet, les UV entraînent une dénaturation thermique de la double hélice d'ADN par rupture des liaisons hydrogène. Lors de la réparation, une erreur dans le ré-appariement du double brin peut se produire, créant ainsi une mutation de la molécule d'ADN. Et toute mutation peut engendrer une modification de l'information contenue dans l'ADN.



L'absorption des UV par l'ADN peut donc provoquer une dénaturation ou une mutation de la molécule d'ADN et générer des cancers par exemple : les UV constituent ainsi des agents mutagènes pour la molécule d'ADN.

La couche d'ozone, en bloquant une grande partie des UV, protège donc les êtres vivants et permet une colonisation des continents par les végétaux puis les animaux.

Conclusion :

Nous avons vu que la longue mise en place de l'atmosphère est intimement liée à des processus géologiques mais aussi biologiques, la naissance de la vie sur Terre ayant permis la composition atmosphérique

actuelle (riche en diazote et dioxygène) et la formation d'ozone, qui protège les êtres vivants contre les rayonnements mutagènes.

Bien que le dioxyde de carbone représente désormais une faible portion des gaz atmosphériques ($< 1\%$), l'atmosphère constitue un réservoir de carbone essentiel à l'équilibre du cycle du carbone sur Terre. Sous l'effet de l'action humaine, la composition des différents réservoirs de carbone tend à se modifier. Le réservoir atmosphérique se retrouve ainsi particulièrement sous pression, menaçant le fragile équilibre naturel établi depuis des millions d'années. Les répercussions sont déjà visibles sur les climats, objets de notre prochain cours.