

Chapitre 1 : L'atmosphère terrestre et la vie

Présentation	2
Activités	4
Activité documentaire 1 : Origine de l'atmosphère et des océans terrestres (p. 18-19)	4
Activité de groupe 2 : Vie terrestre et évolution de l'atmosphère (p. 20-21)	7
Groupe 1 : Les formations de fers rubanés	7
Groupe 2 : Stromatolites et production de dioxygène	9
Groupe 3 : Un aperçu du cycle du dioxygène	9
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite	10
Activité documentaire 3 : L'ozone dans l'atmosphère terrestre (p. 22)	11
Activité documentaire 4 : Les combustibles fossiles (p. 23)	14
Activité documentaire 5 : Le cycle du carbone (p. 24-25)	16
Bilan (p. 27)	19
Exercices	20
Zone d'échauffement (p. 28)	20
L'atelier des apprentis (p. 29)	22
Le repaire des initiés (p. 30)	26
Le coin des experts (p. 31-32)	28

Présentation

Le chapitre 1 traite de l'analyse de l'atmosphère terrestre et de son évolution au cours des temps géologiques. Les compositions des atmosphère primitive et actuelle seront ainsi décrites puis expliquées, en lien avec les nombreux processus géologiques et biologiques impliqués.

Ce premier chapitre est aussi l'occasion d'aborder avec les élèves la composition, la structure et le rôle de la couche d'ozone, l'apparition de la vie, la notion de cycle (notamment avec le cycle du carbone) ou encore de travailler à nouveau les combustibles fossiles. Ces éléments seront évoqués de nouveau dans les prochains chapitres.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- L'ADN support de l'information génétique

Ce qui a été enseigné en première :

- La photosynthèse
- Le rayonnement solaire

Liens avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Liens avec les chapitre 2, 3 et 4.

Ce chapitre ouvre le thème 1 : Science, climat et société. Les éléments abordés dans ce chapitre : l'atmosphère, les combustibles fossiles, le cycle du carbone sont de nouveau évoqués dans les chapitres 2, 3 et 4 qui s'intéressent à la complexité du système climatique et au climat du futur. La notion de cycle du carbone pourra par exemple être mobilisée tout au long de thème.

Bibliographie :

- C. Robert et R. Bousquet, « La dynamique du système Terre », *Géosciences* (2013).
- M. Renard *et al.*, *Éléments de géologie*, 16^e édition du Pomerol (2018).
- M. Gargaud, D. Despois et J-P. Parisot, *L'environnement de la Terre primitive* (2005).
- Peter Raven *et al.*, *Biologie* (2015).
- J-F. Deconinck, *Paléoclimats, l'enregistrement des variations climatiques*, Vuibert (2006).
- R. Delmas, S. Chauzy, J-M. Verstraete, H. Ferré, *Atmosphère, océan et climat*, Belin (2007).
- A. Foucault, *Climatologie et paléoclimatologie*, Dunod (2016).
- M. Rotaru, *Les climats passés de la Terre*, Vuibert (2006).
- J.C. Duplessy et G. Ramstein, *Paléoclimatologie, enquête sur les climats anciens*, EDP Sciences (2013).
- Dossiers de *Pour la science* sur « L'atmosphère » :
<https://www.pourlascience.fr/sd/ecologie/dossier-pour-la-science-n012-410.php>
- Dossiers de *Pour la science* sur « La vie sur Terre, des naissances multiples ? » :
<https://www.pourlascience.fr/util/chutier/pour-la-science-365-335.php>

Sitographie :

- Un dossier thématique du site Planet Terre de l'ENS de Lyon sur le cycle biogéochimique du carbone : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressources/dossiers-thematiques/td-cycle-du-carbone> et sur les stromatolites (généralités) : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/stromatolithes.xml> ;
- Un article de *Trust my Science* sur la Terre primitive : <https://trustmyscience.com/terre-primitive-etait-immense-ocean-sans-continent/> ;
- Un article du site Sciencetips sur l'origine de la vie sur Terre : https://newsletters.artips.fr/Sciencetips/Miller_Soupe/?uiad=063ecd6b66.
- Un article de *Pour la science* sur le Sahara vert, pour étudier un cas de variation climatique passée : <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/comment-le-sahara-vert-a-disparu-12749.php>
- Un article de *Pour la science* sur les variations climatiques récentes : <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/le-climat-des-21-000-dernieres-annees-5466.php>
- Un article de *Pour la science* sur les variations climatiques depuis 800 000 ans : <https://www.pourlascience.fr/sd/environnement/800-000-ans-dhistoire-du-climat-2801.php>
- Une belle infographie du CNRS sur l'apparition de la vie : <https://lejournal.cnrs.fr/infographies/les-origines-de-la-vie>
- Quelques compléments d'informations sur les climats passés : <https://www.reseau-canope.fr/tdc/tous-les-numeros/la-meteorologie/sequences-pedagogiques/climats-du-passe-du-present-et-du-futur.html>

Activités

Dans un premier temps, la formation de l'atmosphère et de l'hydrosphère sont abordées, puis l'évolution de cette atmosphère en lien avec le développement de la vie. Ensuite, on s'intéresse à la couche d'ozone, sa formation et son rôle dans le maintien de la vie sur Terre. Enfin, l'impact des combustibles fossiles est traité avant d'étudier dans une plus large mesure le cycle du carbone.

Activité documentaire 1 : Origine de l'atmosphère et des océans terrestres (p. 18-19)

Le but de cette activité est d'une part de comparer les compositions de l'atmosphère terrestre primitive et actuelle et d'autre part d'expliquer comment les océans se sont formés.

Lien avec le programme : Cette activité comprend des items du début de la partie 1.1 du programme, relatifs à l'évolution de l'atmosphère terrestre.

Objectifs notionnels :

- Il y a environ 4,6 milliards d'années, l'atmosphère primitive était composée de N_2 , CO_2 et H_2O . Sa composition actuelle est d'environ 78 % de N_2 et 21 % de O_2 , avec des traces d'autres gaz (dont H_2O , CO_2 , CH_4 et N_2O).
- Le refroidissement de la surface de la Terre primitive a conduit à la liquéfaction de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère initiale. L'hydrosphère s'est formée, et en ainsi s'est développée la vie.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser des données, en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques.
- Déterminer l'état physique de l'eau pour une température et une pression donnée à partir de son diagramme d'état.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques

Ce graphique permet de comparer les compositions actuelle et primitive de l'atmosphère de la Terre. La représentation en histogramme s'intéresse à 4 constituants majeurs : la proportion en eau, en diazote, en dioxygène et en dioxyde de carbone.

Document 2 : Le dégazage de la Terre primitive

Ce document présente la composition chimique relevée dans les gaz volcaniques. Il sera à associer avec le document 3.

Document 3 : Le bombardement météoritique de la Terre primitive

Ce document permet d'étudier la composition chimique relevée lors du chauffage d'une météorite. L'importance du champ magnétique terrestre dans le maintien de l'atmosphère est aussi présentée.

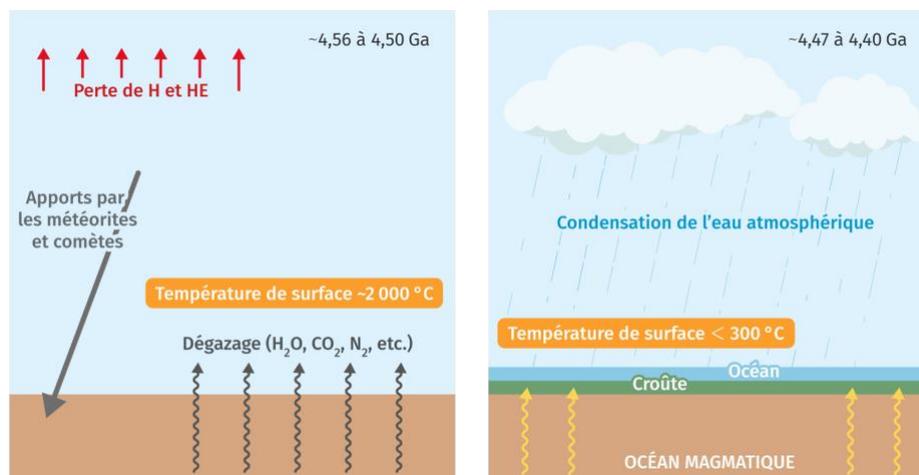
Document 4 : État physique de l'eau et conditions atmosphériques

Dans le diagramme de phases sont indiqués les trois états de l'eau. Le tableau de comparaison pour la Terre et Vénus permet d'étudier deux paramètres : la pression moyenne et la température.

Réponses attendues aux questions :

1. L'atmosphère actuelle contient peu d'eau avec 78 % de diazote, 21 % de dioxygène et du dioxyde de carbone sous forme de traces. Il y a donc un changement de composition entre l'atmosphère primitive et l'atmosphère actuelle : enrichissement en dioxygène et en diazote, diminution en dioxyde de carbone et vapeur d'eau.
2. En analysant le document 2 et le document 3, on s'aperçoit que les compositions des gaz émis par les volcans et lors du chauffage de la météorite sont très proches de la composition primitive de la Terre. On peut donc supposer que l'atmosphère primitive a une origine mixte : liée à l'apport météoritique et au dégazage du manteau terrestre.
3. En considérant que les paramètres de Vénus sont similaires à ceux de la Terre primitive, on remarque qu'à la pression et la température données, l'eau est sous forme de vapeur. Sur la Terre actuelle, à la pression et la température données, l'eau est sous forme liquide.
4. La composition des gaz émis par le volcanisme et l'apport des comètes montrent que l'hydrosphère terrestre a une double origine, car l'eau (H_2O) se retrouve à la fois dans les gaz des volcans et lors du chauffage d'une chondrite. On parle de double origine car l'une est interne à la Terre et l'autre est extraterrestre.

5. Schéma bilan :



Ressources complémentaires :

- « La Terre primitive n'était probablement qu'un immense océan sans continents », *Trust my Science* : <https://trustmyscience.com/terre-primitive-etait-immense-ocean-sans-continents/>.
- Un article de *Pour la science* sur la Terre primitive : <https://www.pourlascience.fr/sr/article/la-terre-avant-la-vie-3407.php>

Activité de groupe 2 : Vie terrestre et évolution de l'atmosphère (p. 20-21)

Le but de cette activité est d'expliquer l'évolution de la composition de l'atmosphère, et notamment d'éclairer le lien entre augmentation de dioxygène dans l'atmosphère et apparition de la vie. À partir de traces fossiles, les premières formes de vie terrestre peuvent ainsi être étudiées.

Lien avec le programme : Cette activité comprend les items de la partie 1.1 du programme relatifs à l'oxygénation de l'atmosphère et à l'apparition de la vie sur Terre.

Objectifs notionnels :

- Les premières traces de vie sont datées d'il y a au moins 3,5 milliards d'années. Par leur métabolisme photosynthétique, des cyanobactéries ont produit le dioxygène qui a oxydé, dans l'océan, des espèces chimiques réduites.
- Le dioxygène s'est accumulé à partir de 2,4 milliards d'années dans l'atmosphère. Sa concentration atmosphérique actuelle a été atteinte il y a 500 millions d'années environ.
- Les sources et puits de dioxygène atmosphérique sont aujourd'hui essentiellement liés aux êtres vivants (photosynthèse et respiration) et aux combustions.

Objectifs méthodologiques :

- Mettre en relation la production de dioxygène dans l'atmosphère avec des indices géologiques (oxydes de fer rubanés, stromatolites, etc.).
- Ajuster les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène.

Durée estimée : 55 minutes.

Présentation des documents

Document 1 commun à tous les groupes : Évolution de la pression partielle de différents gaz au cours du temps

Ce graphique représente l'évolution de la proportion de différents gaz présents dans l'atmosphère au cours du temps. Les élèves pourront remarquer que la teneur en dioxygène augmente à partir de 2,4 Ga. Les autres éléments ont été vus dans l'activité 1.

Groupe 1 : Les formations de fers rubanés

Présentation des documents

Document 2 : Formation de fers rubanés

Les fers rubanés (BIF pour *Banded Iron Formations*) sont exploités en gisements pour leur richesse en fer. Ce document sert de document naturaliste pour expliquer les traces laissées

par le dioxygène. Il peut éventuellement être complété avec un échantillon disponible au laboratoire de SVT.

Document 3 : Oxydation du fer

Ce document indique les équations d'oxydation du fer. Il peut être utilisé pour un travail en interdisciplinarité. Il pourra, si les conditions matérielles le permettent, être complété par le TP suivant.

Protocoles et résultats expérimentaux

Oxydation de l'élément fer

Cette manipulation permet de montrer que la production de dioxygène a entraîné l'oxydation du fer et conduit à la formation de dépôt de fer rubané.

Matériel nécessaire :

- béchers,
- sulfate de fer (FeSO_4) solide ou solution de sulfate de fer (II) ($\text{Fe}_{2+}(\text{aq})$; $\text{SO}_{42-}(\text{aq})$) ;
- solution d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+(\text{aq})$; $\text{HO}^-(\text{aq})$) à 0,1 mol·L⁻¹,
- bulleur à dioxygène,
- spatule.

Protocole :

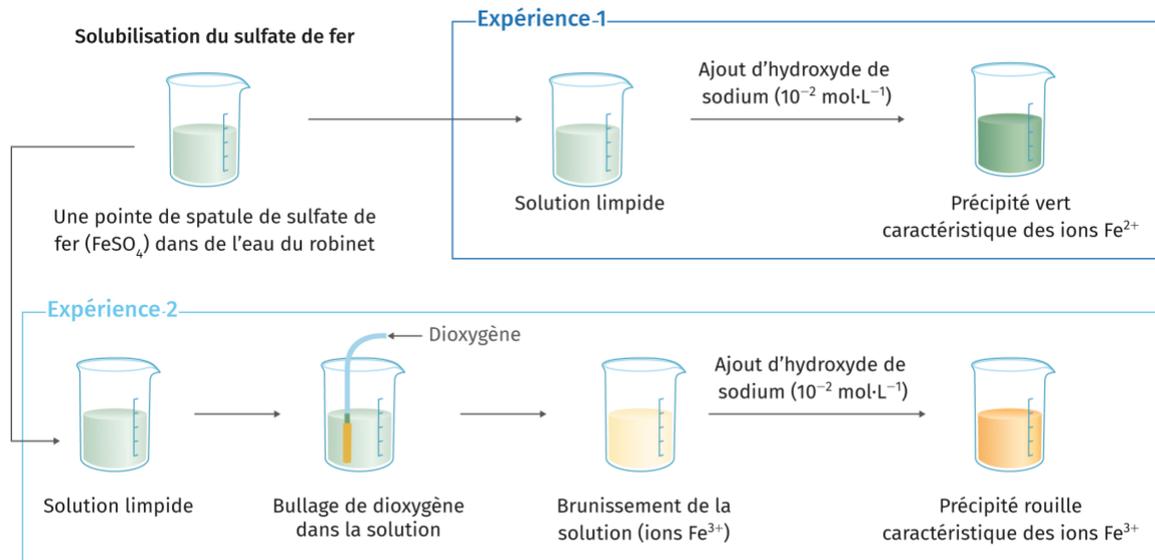
- Mélanger dans un bécher une pointe de spatule de sulfate de fer avec de l'eau du robinet, ou verser un peu de solution de sulfate de fer (II) dans un bécher.
- Agiter à l'aide d'une spatule.
- Ajouter quelques gouttes d'une solution d'hydroxyde de sodium.
- Un précipité vert caractéristique des ions fer (II) Fe_{2+} apparaît.
- Dans un deuxième bécher, mélanger une pointe de spatule de sulfate de fer (II) avec de l'eau du robinet.
- Placer un bulleur dans la solution pour incorporer du dioxygène. La solution vire au brun (apparitions des ions fer (III) Fe_{3+}).
- Ajouter de l'hydroxyde de sodium. Un précipité rouille apparaît, il est caractéristique des ions fer (III) Fe_{3+} .

Résultats attendus :

L'ajout du dioxygène via le bulleur entraîne un changement de couleur. La solution vire au brun (apparitions des ions fer (III) Fe_{3+}).

L'ajout de l'hydroxyde de sodium fait apparaître un précipité rouille, il est caractéristique des ions fer (III) Fe_{3+} .

On peut donc conclure que lorsque l'atmosphère s'enrichit en O_2 (devient oxydante), l'oxygène dissous oxyde le fer qui précipite alors sous forme $\text{Fe}(\text{OH})_3$; l'apport d'ions OH^- tire l'équilibre dans le sens de la précipitation.



Ressources complémentaires :

- Un article de Pierre Thomas sur les fers rubanés : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/lmg364-2011-10-10.xml>.

Groupe 2 : Stromatolites et production de dioxygène

Présentation des documents

Document 4 : Les stromatolites : des structures mixtes

La photographie illustre des stromatolites d'Australie. Le texte associé détaille la structure si particulière des stromatolites. Ce document est à mettre en lien avec le document 5.

Document 5 : Organisation des stromatolites

Ce document fait le lien entre forme fossile et forme actuelle des stromatolites. Il schématise aussi la structure d'une couche de stromatolite.

Ressources complémentaires :

- Généralités sur les stromatolites : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/stromatolithes.xml>.

Groupe 3 : Un aperçu du cycle du dioxygène

Présentation des documents

Document 6 : Respiration et photosynthèse participent aux transferts de dioxygène

Ce document permet de mettre en évidence le cycle du dioxygène. Il est fondé sur des éléments du métabolisme déjà connus des élèves : la photosynthèse et la respiration.

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. L'augmentation de la teneur en dioxygène dans les océans a oxydé le fer. Cela a conduit à la formation d'oxydes de fer qui ont précipité. Il en résulte une formation particulière : les formations de fer rubané ou BIF. On peut dater ces formations entre -3,8 et -2 Ga. On suppose donc que le dioxygène est apparu dans l'océan à cette période, car il est inhérent à la mise en place de ces structures.

Groupe 2 :

1. Les stromatolites réalisent la photosynthèse et libèrent ainsi du dioxygène. En datant les plus vieux fossiles à 3,5 Ga, ce qui en fait les plus anciennes formes de vie terrestres, on peut donc conclure qu'à partir de cette date, il y a eu production de dioxygène dans les océans. Cette production est donc corrélée à l'apparition de la vie.

Groupe 3 :

1. On détermine un puit comme un élément qui consomme du dioxygène, c'est le cas de la respiration et de la combustion. Les éléments sources, produisant du dioxygène, sont les éléments réalisant la photosynthèse, comme par exemple les organismes chlorophylliens

Ressources complémentaires :

- Un article de *Pour la science* sur l'apparition de la vie :
<https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/des-traces-de-vie-de-37-milliards-danneesnbsp-12414.php>

Activité documentaire 3 : L'ozone dans l'atmosphère terrestre (p. 22)

Le but de cette activité est de présenter la formation de l'ozone dans l'atmosphère terrestre, la position de la couche d'ozone et son effet bénéfique sur le développement de la vie.

Lien avec le programme : Cette activité comprend quelques items de la partie 1.1 du programme traitant de la couche d'ozone, de sa formation et de sa fonction.

Objectifs notionnels :

- Sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, le dioxygène stratosphérique peut se dissocier, initiant une transformation chimique qui aboutit à la formation d'ozone.
- Celui-ci constitue une couche permanente de concentration maximale située à une altitude d'environ 30 km.
- La couche d'ozone absorbe une partie du rayonnement ultraviolet solaire et protège les êtres vivants de ses effets mutagènes.

Objectifs méthodologiques :

- Interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet.

Durée estimée : 35 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Synthèse de l'ozone stratosphérique

Ce schéma présente les différentes étapes de la formation de l'ozone stratosphérique.

Document 2 : La couche d'ozone sur Terre

Ce graphique représente la pression en ozone en fonction de l'altitude et permet ainsi de localiser la couche d'ozone.

Document 3 : Absorption de l'ADN et de l'ozone

Ce document représente le spectre d'absorption de l'ADN en fonction de la longueur d'onde. On observe également les radiations atteignant la surface de la Terre et celles atteignant la haute atmosphère. C'est un document qui peut se révéler difficile à analyser, il peut ainsi être bénéfique d'aider ou de guider les élèves avec les questions suivantes.

Aide à l'analyse :

La courbe violette en trait plein correspond aux radiations qui atteignent le sommet de l'atmosphère.

- Comment l'irradiance spectrale (= puissance énergétique) évolue-t-elle en fonction des différentes longueurs d'ondes ?

La courbe violette en trait pointillés correspond aux radiations atteignant la surface de la Terre.

- Indiquer quelle est la puissance énergétique pour des longueurs d'ondes de 280 nm (uvB).
- Indiquer quelle est la puissance énergétique pour des longueurs d'ondes de 300 nm (uvA).

La courbe bleue correspond au spectre d'absorption de l'ADN.

- Quelles sont les longueurs d'ondes les plus absorbées par l'ADN ?

L'aire colorée en jaune correspond aux radiations absorbées par l'ozone.

- Les UV sont-ils absorbés par l'ozone ?

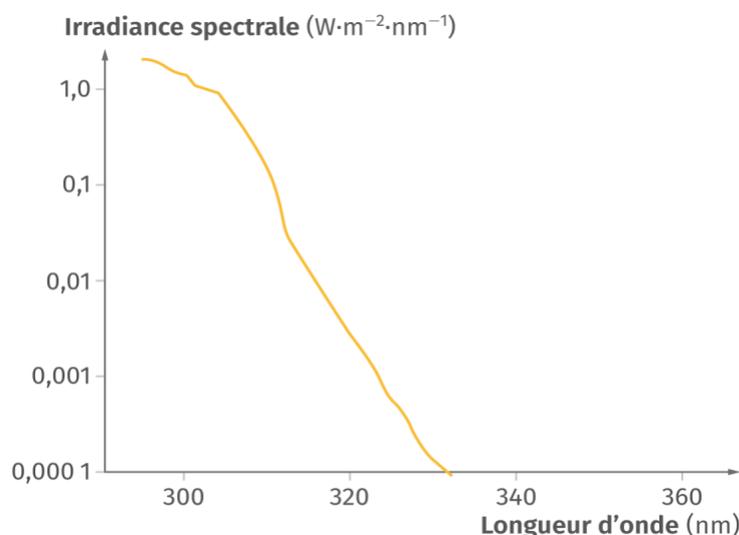
Document 4 : Effets du rayonnement UV sur l'ADN

Ce document représente les effets des UV sur l'ADN. Lorsque des rayons UV atteignent la molécule d'ADN, ils créent une déstabilisation de la molécule entraînant l'apparition d'un dimère de thymine. Cela entraîne une erreur de complémentarité et donc l'apparition d'une mutation.

Réponses attendues aux questions :

1. La couche d'ozone est située entre 20 et 40 km d'altitude car c'est là que la pression en ozone est la plus importante. La couche d'ozone se forme par la dissociation de dioxygène en un atome d'oxygène et l'association avec une molécule libre de dioxygène. Cela se fait sous l'action des rayons UV du soleil.

2. Le spectre d'absorption de l'ozone peut être représenté avec l'allure suivante :



Une comparaison avec le spectre d'absorption de l'ADN montre que les deux molécules absorbent sensiblement les mêmes rayonnements. Les rayons UV non absorbés par l'ozone en altitude peuvent donc être absorbés par l'ADN à la surface de la Terre.

3. La couche d'ozone terrestre permet de filtrer les UV qui parviennent à la surface de la Terre. Les UV non absorbés par l'ozone sont absorbés par l'ADN en provoquant des effets mutagènes, la couche d'ozone limite donc les mutations qui peuvent survenir chez les organismes vivants terrestres.

Ressources complémentaires :

- « Effets des UV sur l'ADN : lésions et mutations » (par Emilie Warrick - ESPCI Paris) : <https://biologiedelapeau.fr/spip.php?article70>
- Un article de *Pour la science* sur la couche d'ozone, pour étudier un autre cas intéressant : <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/une-nouvelle-menace-sur-la-couche-dozone-12630.php>

Activité documentaire 4 : Les combustibles fossiles (p. 23)

Cette activité présente le mode de formation des combustibles fossiles. Elle permet de faire émerger les notions de renouvelabilité en s'appuyant notamment sur des notions vues précédemment, notamment en cycle 4.

Lien avec le programme : Les items de la fin de la partie 1.1 concernant les combustibles sont traités dans cette activité.

Objectifs notionnels :

- Les combustibles fossiles se sont formés à partir du carbone des êtres vivants, il y a plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions d'années.
- Ils ne se renouvellent pas suffisamment vite pour que les stocks se reconstituent : ces ressources en énergie sont dites non renouvelables.

Durée estimée : 25 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Formation d'une couche de charbon

Ce schéma représente le mécanisme de formation au cours du temps de couches de charbon, et notamment l'alternance visible dans le paysage à l'affleurement.

On peut attirer l'attention des élèves sur la nécessité de l'inondation du sol, qui préserve une partie de la matière organique de la décomposition.

Document 2 : Minerai de lignite : un combustible fossile

Cette photographie illustre un combustible fossile : la lignite. Si des échantillons sont disponibles au laboratoire de SVT, il peut être pertinent de les montrer aux élèves. La variation de la teneur en carbone peut aussi être abordée, en lien avec le diagramme de Van Krevelen (présent dans les exercices).

Document 3 : Carbonifère et CO₂ atmosphérique

Ce graphique représente la variation de la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique au cours des temps géologiques. Ce document combine plusieurs sources, notamment des extrapolations faites à partir du nombre de stomates retrouvés sur des feuilles fossilisées.

Réponses attendues aux questions :

1. Le charbon se forme par la transformation de la matière organique fossile. Celle-ci est accumulée dans un bassin inondé. En partie préservée de la décomposition, recouverte de sédiments puis enfoncée (subsidence), elle est progressivement transformée sous l'effet de l'augmentation de pression et de température. On parle de combustible fossile car cette matière peut « brûler » et qu'elle est issue d'une lente transformation (traces de végétaux retrouvés).

- 2.** Au Carbonifère, une végétation très dense recouvre les terres émergées. Il y a ensuite enfouissement d'une grande quantité de matière organique, issue de ces forêts, qui participe à la formation de combustibles fossiles. La forte consommation en dioxyde de carbone par les plantes, due à la photosynthèse, a entraîné une baisse de sa teneur. Cela a eu un impact important sur le climat : diminution de l'effet de serre, et donc refroidissement (des connaissances vues dans les prochains chapitres sont nécessaires pour conclure sur ce dernier point).
- 3.** Le carbone utilisé lors de la combustion du charbon provient de la transformation du carbone organique des végétaux qui se sont développés il y a des dizaines, voire des centaines de millions d'années.
- 4.** Les stocks de combustibles fossiles sont dits « non renouvelables », car leur temps de formation est extrêmement lent (plusieurs dizaines, voire centaines de millions d'années) et qu'ils ne se régénèrent ainsi pas à l'échelle d'une vie humaine.

Activité documentaire 5 : Le cycle du carbone (p. 24-25)

Cette activité présente le cycle du carbone et permet de voir les notions de flux et de réservoirs, mais également de comprendre que les réservoirs peuvent être subdivisés en plus petit réservoirs. Par ailleurs, l'action anthropique est mise en avant par son action sur le cycle du carbone.

Lien avec le programme : La dernière activité du chapitre correspond aux phrases de la partie 1.1 du programme relatives au cycle biogéochimique du carbone.

Objectifs notionnels :

- Le carbone est stocké dans plusieurs réservoirs superficiels : l'atmosphère, les sols, les océans, la biosphère et les roches.
- Les échanges de carbone entre ces réservoirs sont quantifiés par des flux (tonne/an).
- Les quantités de carbone dans les différents réservoirs sont constantes lorsque les flux sont équilibrés. L'ensemble de ces échanges constitue le cycle du carbone sur Terre.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser un schéma représentant le cycle biogéochimique du carbone pour comparer les stocks des différents réservoirs et identifier les flux principaux de carbone d'origine anthropique ou non.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Des flux et des réservoirs de carbone

Ce schéma représente les flux entre différents réservoirs constituant le cycle du carbone. Cette représentation sous forme de coupe permet aux élèves de mieux se représenter les flux et réservoirs que dans le schéma fonctionnel du document 4. Cependant, ce document 1 est moins complet et peut être plus difficile à lire. La question 1 oriente l'analyse pour montrer que le carbone est présent sous de très nombreuses formes.

Pour favoriser une compréhension complète du cycle du carbone, il convient d'allier l'analyse des documents 1 et 4.

Document 2 : L'océan : un exemple de réservoir de carbone

Ce document représente à l'échelle de l'océan les différents réservoirs de carbone et permet de comprendre que même au sein d'un réservoir, des interactions parfois complexes coexistent. On découpe l'océan en deux zones : une zone de surface et une zone profonde. Précision du texte : 99 % du carbone qui atteint le fond n'est pas utilisé par les bactéries. La majeure partie est dissoute ou revient vers la surface.

Document 3 : Un exemple de flux de carbone

Ce document présente les équations-bilan de la formation des carbonates et permettent d'appréhender un exemple de flux de carbone par un ensemble de réactions chimiques.

Document 4 : Représentation du cycle actuel du carbone

Ce schéma représente les flux de carbone entre les différents réservoirs. Il indique également les impacts anthropiques. Cette représentation synthétique du cycle du carbone est reprise dans le bilan du chapitre car c'est celle qui est à retenir.

Réponses attendues aux questions :

1. Le carbone dans ce schéma est représenté par :

- la matière organique enfouie ;
- le phytoplancton ;
- le CO₂ atmosphérique ;
- une partie des sédiments ;
- les déchets organiques ;
- les forêts et la biomasse continentale (agrosystèmes) ;
- les sources énergies issues de la biomasse continentale : bois, biocarburants, biogaz ;
- les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz).

2. Un réservoir désigne un espace pouvant être délimité, dans lequel du carbone est stocké sous différentes formes. L'océan (profond et de surface) est, par exemple, un réservoir de carbone. Les sédiments (plus généralement les roches), l'atmosphère et la biosphère constituent aussi des réservoirs de carbone.

3. Dans le cas du réservoir de l'océan, celui-ci est subdivisé en deux parties : l'océan de surface et l'océan profond. Les quantités de carbone stockées ne sont pas les mêmes (700 Gt pour la surface contre 38 000 Gt pour l'océan profond).

4. Un flux désigne le transfert d'un élément d'un réservoir à un autre. La respiration ou la photosynthèse sont des flux biologiques. La combustion ou la précipitation constituent un flux chimique. L'enfouissement, la dissolution, la précipitation et la sédimentation sont, quant à eux, des flux physiques.

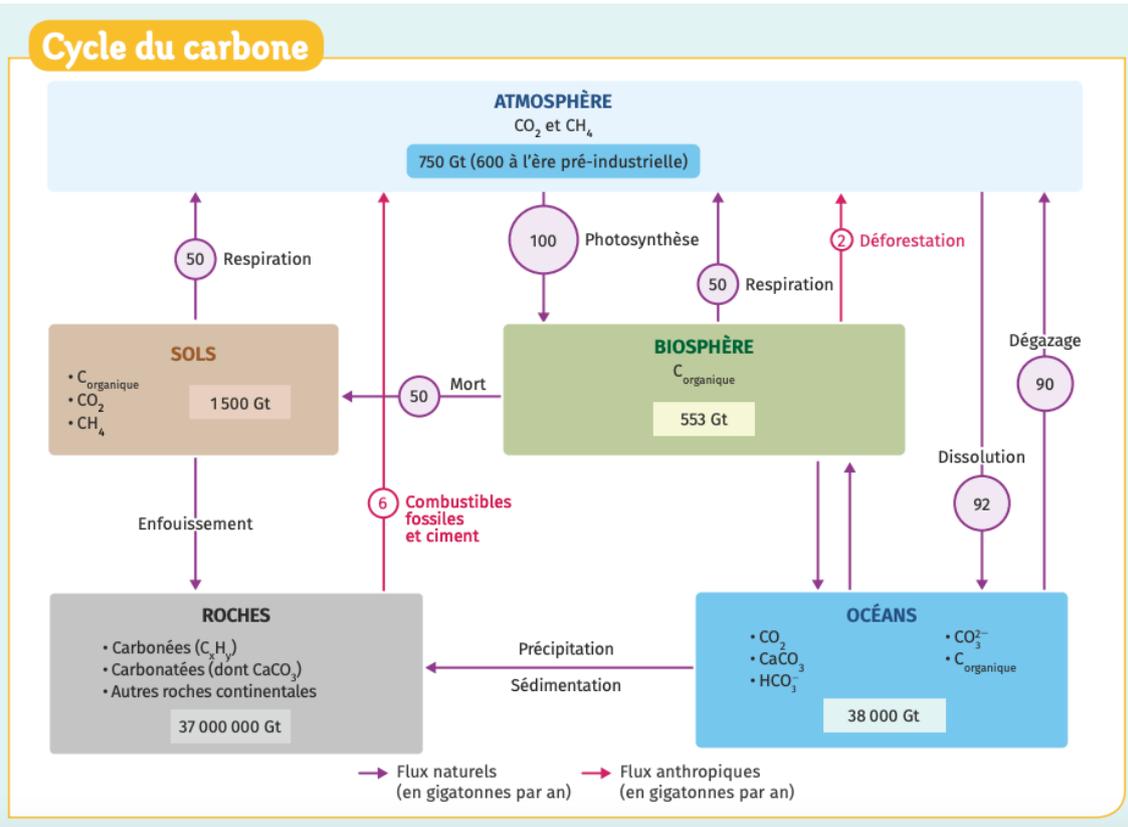
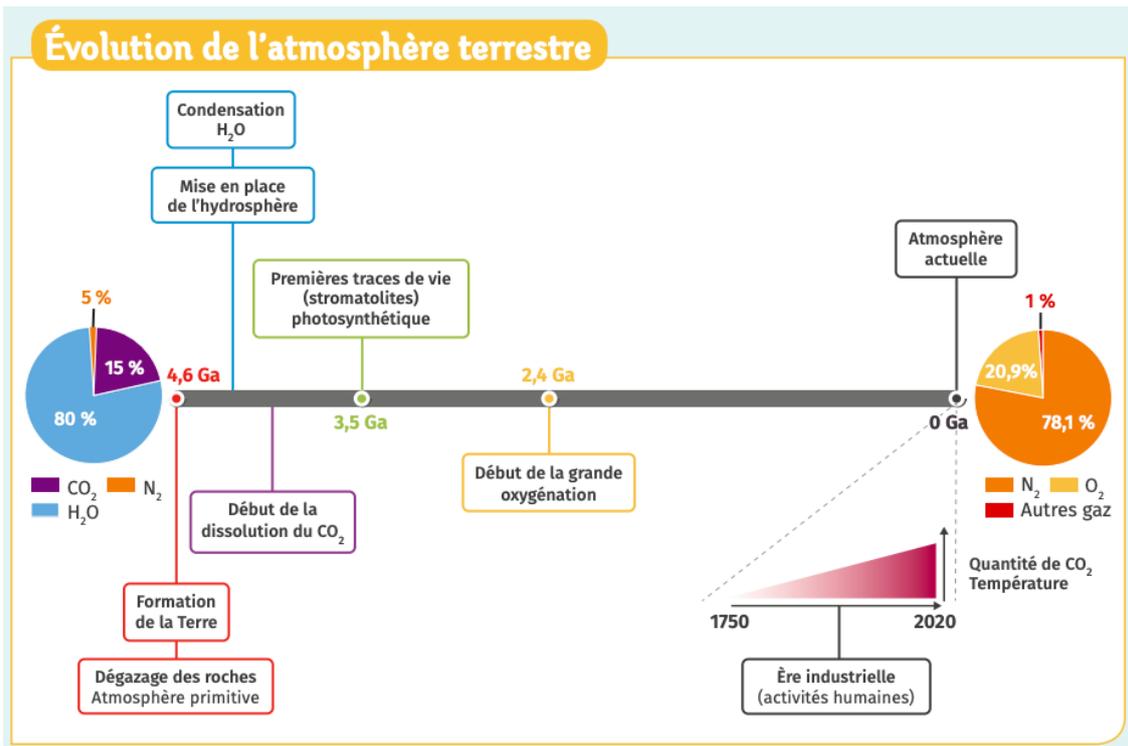
5. La déforestation et l'utilisation de combustibles fossiles, ainsi que la production de ciment, sont des activités anthropiques. La déforestation libère plus de 2 Gt dans l'atmosphère, et les combustibles fossiles 6 Gt, pour un total de 8 Gt. Par ailleurs, il y a un équilibre entre dissolution (92 Gt) et le dégazage ajouté à la déforestation (ce qui fait $90 + 2 = 92$ Gt). On a aussi un équilibre entre photosynthèse et respiration (100 Gt). En revanche, l'utilisation des combustibles libère 6 Gt qui ne sont pas absorbés. Ces 6 Gt sont en excès dans l'atmosphère. Ils participent alors à l'effet de serre.

On peut ainsi mettre en évidence un enrichissement de la quantité de carbone stockée dans l'atmosphère d'origine anthropique, qui contribue à déstabiliser le cycle du carbone, autrement équilibré.

Ressources complémentaires :

- Quelques compléments sur le cycle du carbone :
<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html>

Bilan (p. 27)



Exercices

Zone d'échauffement (p. 28)

- 1. Sur Terre, l'atmosphère actuelle est composée de :**
 - b. 78 % de diazote et 21 % de dioxygène.
- 2. La vie s'est d'abord développée sur Terre dans :**
 - a. les océans.
- 3. Les premières traces de vie sont datées de :**
 - b. 3,5 milliards d'années.
- 4. Le dioxygène s'est accumulé dans l'atmosphère à partir de :**
 - b. 2,4 milliards d'années.
- 5. L'ozone est formé sous l'action des UV à partir :**
 - c. d'un atome d'oxygène et d'une molécule de dioxygène.
- 6. La couche d'ozone stratosphérique est située entre :**
 - c. 20 et 40 km d'altitude.
- 7. La formation de combustibles fossiles se fait :**
 - b. en quelques dizaines à centaines de millions d'années.
- 8. Les combustibles fossiles sont :**
 - c. une source d'énergie non renouvelable.
- 9. Dans l'océan, le CO₂ atmosphérique peut :**
 - b. être intégré dans le processus de photosynthèse du phytoplancton.
- 10. Parmi ces flux du cycle du carbone, lequel est d'origine anthropique ?**
 - c. La déforestation.
- 11. Justifier cette phrase de la paléoclimatologue Valérie Masson-Delmotte :** « Beaucoup de décideurs politiques n'ont pas intégré l'inertie du cycle du carbone et du système climatique et donc l'irréversibilité des changements induits par les rejets de gaz à effet de serre, ainsi que la nécessité d'agir très vite pour stabiliser la trajectoire d'évolution du climat. »

Valérie Masson-Delmotte dénonce l'impact important des changements anthropiques sur le cycle du carbone. En raison de l'inertie de ce cycle, les modifications causées par l'homme ont un effet durable sur le système climatique.

Une molécule de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère y restera plusieurs centaines d'années.

Même en arrêtant totalement l'émission du dioxyde de carbone d'origine humaine, la concentration en dioxyde de carbone ne diminuerait pas avant plusieurs centaines d'années. Ainsi, même en diminuant les rejets de dioxyde de carbone, une baisse de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère ne sera pas observable immédiatement.

L'atelier des apprentis (p. 29)

12. Comparaison des atmosphères des planètes telluriques

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère.

Correction :

1. Sur Vénus, on observe une forte teneur de dioxyde de carbone (96 %), à la différence de la Terre, où sa proportion atteint seulement les 400 ppm (0,04 %). L'atmosphère de la Terre contient par ailleurs nettement plus de diazote que l'atmosphère de Vénus (78 % contre 3,5 %).

2. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre présent en forte quantité dans l'atmosphère de Vénus. La puissance radiative issue du Soleil est supérieure à celle de la Terre, car Vénus est plus proche du Soleil. Bien que Vénus ne soit que la deuxième planète du système solaire, et située à 108 millions de kilomètres du Soleil, la grande teneur de dioxyde de carbone dans son atmosphère entraîne un important effet de serre sur la planète. Cet effet de serre est plus important que sur Terre.

Ressource supplémentaire :



La pression et la composition exactes de l'atmosphère de Mars sont connues depuis moins d'un demi-siècle et remontent aux premières analyses *in situ* effectuées en 1976 par les « atterrisseurs » des sondes Viking 1 et Viking 2. [...]

On sait aujourd'hui que Mars possède une atmosphère ténue dont la pression moyenne au niveau de référence martien est par définition de 610 Pa, avec une température moyenne de -63°C . Elle est composée principalement de dioxyde de carbone CO_2 (96,0 %), d'argon Ar (1,93 %) et de diazote N_2 (1,89 %). Compte tenu de la faible gravité à la surface de Mars, la hauteur d'échelle de cette atmosphère est de 11 km, plus d'une fois et demie celle de l'atmosphère terrestre, qui n'est que de 7 km.

D'après « Mars », Wikipedia.org.

Suggestion de question supplémentaire :

3. **Émettre des hypothèses pour expliquer la faible épaisseur de l'atmosphère sur Mars.** On peut supposer que l'atmosphère de Mars est très faible du fait de sa taille et de sa masse qui ne permet pas de retenir l'atmosphère, en raison de sa force de gravitation faible. On peut également émettre l'hypothèse que les vents solaires ont pu souffler l'atmosphère, du fait d'une absence de champ magnétique protecteur, comme sur Terre.

Sources/Bibliographie :

- Wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_\(plan%C3%A8te\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te))

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

Ressource supplémentaire :



L'atmosphère de Vénus est plus dense et plus chaude que celle de la Terre. La température et la pression à la surface sont respectivement de 740 K (soit environ 470 °C) et 93 bar. Des nuages opaques faits d'acide sulfurique se trouvent dans l'atmosphère, rendant l'observation optique de la surface impossible. Les principaux gaz atmosphériques de Vénus sont le dioxyde de carbone et l'azote. Les autres composants sont présents seulement sous forme de traces.

D'après « Vénus », Wikipedia.org.

Nuages de l'atmosphère de Vénus révélés par ultraviolet.

1. Comparer les atmosphères de Vénus et de la Terre.

Sur Vénus, on observe une forte teneur de dioxyde de carbone (96 %), à la différence de la Terre, où sa proportion atteint seulement les 400 ppm (0,04 %). L'atmosphère de la Terre contient par ailleurs nettement plus de diazote que l'atmosphère de Vénus (78 % contre 3,5 %)

2. Calculer la masse de chaque gaz (CO₂ et N₂) sachant que la masse de l'atmosphère de Vénus est évaluée à 4,8 × 10²⁰ kg.

La proportion de CO₂ est évaluée à 96,5 % soit :

$$m(\text{CO}_2) = 4,8 \times 10^{20} \times 0,965 = 4,6 \times 10^{20} \text{ kg}$$

La masse de N₂ représente 3,5 % soit :

$$m(\text{N}_2) = 4,8 \times 10^{20} \times 0,035 = 1,7 \times 10^{19} \text{ kg}$$

3. Indiquer les éléments que les scientifiques doivent prendre en compte pour l'observation de la surface de Vénus et l'envoi de sondes.

L'atmosphère de Vénus est très dense, la surface de la planète n'est pas visible directement. Les sondes envoyées sur la planète doivent résister à des très fortes températures et à l'acide sulfurique.

4. Vénus est la planète la plus chaude du Système solaire. Expliquer pourquoi.

En plus de sa proximité au Soleil, Vénus a une très forte teneur en CO₂, qui contribue à un fort effet de serre.

13. Croissance de stromatolites

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O₂) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

Correction :

1. La croissance des stromatolites se fait dans un milieu marin. Des organismes de type cyanobactéries se multiplient et emprisonnent des particules carbonatées.

2. L'échelle de la photo est de 5 cm. La distance entre les deux croix blanches est donc de 23,75 cm. La croissance des stromatolites est de 0,4 mm/an. Ainsi il faut plus de 60 ans pour obtenir ce dépôt.

$$\frac{237,5}{0,4} = 59 \text{ ans}$$

Suggestion de question supplémentaire :

3. Proposer une hypothèse expliquant l'alternance de bandes plus claires et de bandes plus foncées ?

Les alternances de couleurs sont dues à la teneur en matière organique emprisonnée dans les couches de dépôts. Les zones plus foncées correspondent à des concentrations en matière organique plus importante, les bandes plus claires à des dépôts plus détritiques.

Certains scientifiques supposent que les bandes claires se formeraient le jour, et les bandes sombres, la nuit.

Ressources pour aller plus loin :

- Vidéo : à la découverte des stromatolites en Argentine :
https://www.youtube.com/watch?v=_RS2y34JTAo&feature=youtu.be

14. Évolution de la matière organique fossile

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

Correction :

1. Sur le document, on note qu'il y a 3 origines possibles pour la formation de matière organique fossile :

- origine marine ;
- origine lacustre ;
- origine terrestre.

Indépendamment de ces trois origines possibles, les rapports O/C et H/C diminuent toujours pour former des combustibles fossiles. Une baisse de ces rapports traduit surtout une diminution des numérateurs, et donc une augmentation relative du dénominateur, qui correspond à la teneur en carbone. On met donc en évidence un enrichissement relatif en carbone.

Suggestion de question supplémentaire :**2. Proposer des hypothèses sur l'obtention expérimentale de ce graphique.**

Ce graphique est obtenu par étude de matières fossiles (hydrocarbures) et d'échantillons de matière organique (de trois origines). Chauffés, les teneurs retrouvées dans les échantillons sont comparées à celles des hydrocarbures.

Sources/Bibliographie :

- M. Renard et al., *Éléments de géologie*, 16^{ème} édition du Pomerol (2018).

Ressources pour aller plus loin :

- Diagramme de Van Krevelen :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Van_Krevelen.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

1. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine terrestre.

Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine terrestre est de 0,8 mg de CH/g de COT.

2. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine lacustre.

Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine lacustre est de 1,25 mg de CH/g de COT.

3. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine marine.

Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine marine est de 1,5 mg de CH/g de COT.

4. Préciser pour quelle matière organique l'enrichissement en carbone est le plus important.

La matière organique d'origine marine voit son enrichissement en carbone le plus important (passage de 1,5 à 0,5 H/C).

5. Montrer que l'évolution de la matière organique s'accompagne d'un enrichissement en carbone.

Sur le document, on note qu'il y a 3 origines possibles pour la formation de matière organique fossile :

- origine marine ;
- origine lacustre ;
- origine terrestre.

Indépendamment de ces trois origines possibles, les rapports O/C et H/C diminuent toujours pour former des combustibles fossiles. Une baisse de ces rapports traduit surtout une diminution des numérateurs, et donc une augmentation relative du dénominateur, qui correspond à la teneur en carbone. On met donc en évidence un enrichissement relatif en carbone.

6. Proposer des hypothèses sur l'obtention expérimentale de ce graphique.

Ce graphique est obtenu par étude de matières fossiles (hydrocarbures) et d'échantillons de matière organique (de trois origines). Chauffés, les teneurs retrouvées dans les échantillons sont comparées à celles des hydrocarbures.

Le repaire des initiés (p. 30)

15. Les dépôts du bassin de Graissessac (Hérault, France)

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

Correction :

1. Pour obtenir un dépôt de 2 mètres avec une sédimentation de 0,1 mm/an, il faudra 20 000 ans.

$$\frac{2\,000}{0,1} = 20\,000 \text{ ans}$$

2. Les filons de charbon se forment par accumulation de matière organique rapidement recouverte de sédiments détritiques, dans un milieu inondé. Après quelques centaines de millions d'années (augmentation de la pression, de la température) et un enrichissement en carbone, la matière organique se transforme en charbon.

3. Le charbon, comme le pétrole, est une ressource fossile non renouvelable, car le temps de formation de cette ressource (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions d'années) est infiniment plus long que sa vitesse de consommation, à l'échelle d'une vie humaine.

Ressources pour aller plus loin :

- Jean-Claude Lataillade, « Graissessac, autrefois... », *Saga Information*, n°359 (2017) : http://www.saga-geol.asso.fr/Documents/Saga_359_Graissessac.pdf.

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

1. Calculer la durée nécessaire pour obtenir un dépôt de 2 mètres, avec une vitesse de formation d'environ 0,1 mm/an.

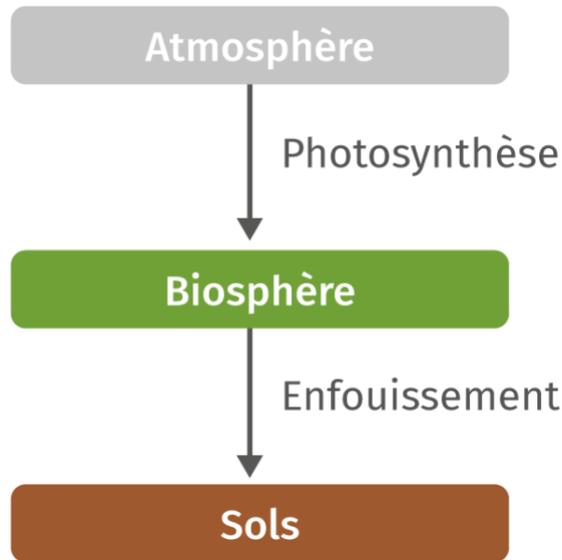
Pour obtenir un dépôt de 2 mètres avec une sédimentation de 0,1 mm/an, il faudra 20 000 ans.

$$\frac{2\,000}{0,1} = 20\,000 \text{ ans}$$

2. Indiquer quels réservoirs de carbone ont été impliqués dans la formation de ce charbon.

L'atmosphère, la biosphère et les sols, sont les principaux réservoirs de carbone qui sont intervenus dans la formation de ce charbon, avec des flux de carbone entre eux.

3. Représenter sous la forme d'un schéma simplifié les transferts de carbone ayant eu lieu entre les différents réservoirs amenant à la formation de ce charbon.



16. Les défis de la terraformation de Mars

Compétence principalement travaillée : Déterminer l'état physique de l'eau pour une température et une pression données

Correction :

1. La forte teneur en dioxyde de carbone, l'absence de dioxygène, les températures négatives (jusqu'à -140 °C) rendent l'atmosphère de Mars inhospitalière.

2. Pour terraformer Mars, il faut de l'eau sous forme liquide et il faut apporter du dioxygène, ou le former sur place. Un autre problème est celle des vents solaires, notamment à cause des radiations : il conviendra de se protéger un maximum.

Les solutions possibles peuvent être un apport d'eau depuis la Terre, la formation du dioxygène sur place (par exemple par installation de végétaux réalisant une photosynthèse), une modification du sol (régolithe) avec un apport de matière organique.

Ressources complémentaires :

- Un épisode de la série Data Science sur Arte, intitulé « On pourra bientôt vivre sur Mars » : <https://www.arte.tv/fr/videos/081077-016-A/data-science-vs-fake/>. Intéressant, mises à part quelques imprécisions scientifiques.

Le coin des experts (p. 31-32)

17. Ozone stratosphérique et chlorofluorocarbures

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

Correction :

1. Les CFC représentent un danger pour la vie sur Terre, car ils ont une action néfaste sur la couche d'ozone. Ils dissocient progressivement les molécules d'ozone. Or, l'ozone filtre les UV émis par le Soleil et ces UV sont des agents mutagènes qui altèrent l'ADN des êtres vivants. Ils ont donc un effet délétère sur les êtres vivants.
2. Les CFC contribuent, par action de l'atome de chlore, à la dissociation des molécules d'ozone.
3. On note une diminution de la teneur en ozone au niveau du pôle sud entre 1979 et 1998. Après la mise en place du protocole de Montréal, en 1985, visant à interdire l'utilisation de CFC, on peut observer en 2012 une régression positive. La couche d'ozone s'épaissit de nouveau au dessus de l'Antarctique.

Sources/Bibliographie :

- Le protocole de Montréal : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenariats-organisations/appauvrissement-couche-ozone-protocole-montreal.html>.

Ressources complémentaires :

- Une vidéo de « Brut » (France TV) sur le protocole de Montréal : https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/video-comment-le-protocole-de-montreal-a-t-il-contribue-a-sauver-la-couche-d-ozone_3718427.html.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

1. Résumer en une phrase l'action des CFC.

Les CFC contribuent, par action de l'atome de chlore, à la dissociation des molécules d'ozone.

2. Décrire l'évolution de la couche d'ozone entre 1979 et 2012.

En 1979, au-dessus de l'Antarctique, l'épaisseur de la couche d'ozone est d'environ 250 Dobson. En 1998, l'épaisseur n'est plus que de 100 à 150 Dobson environ. En 2012, on a un retour à une épaisseur de 250 Dobson.

3. En déduire l'impact du protocole de Montréal signé en 1985.

Après la mise en place du protocole de Montréal, en 1985, visant à interdire l'utilisation de CFC, on observe en 2012 une régression positive. La couche d'ozone s'épaissit de nouveau au-dessus de l'Antarctique.

18. Expériences de Miller et de Birkeland : des modélisations physiques historiques

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

Correction :

1. Les éléments de l'expérience de Miller font référence à :

- « Arcs électriques » : éclairs présents pendant un orage ;
- « Gaz » : gaz présents dans l'atmosphère primitive ;
- « Eau » : océan.

2. Miller obtient des bases azotées et des acides aminés dans son expérience. Ces éléments sont les briques de base des protéines et de l'ADN, et donc de constituants majeurs des êtres vivants. On peut ainsi supposer que l'apparition de ces « briques élémentaires » a abouti à l'émergence des êtres vivants.

3. L'expérience de Birkeland se base sur une Terrella, un dispositif expérimental permettant d'étudier les propriétés électromagnétiques de la Terre. Ce système est constitué d'une boule aimantée (avec un pôle nord et un pôle sud) placée dans une chambre à vide, et soumis à un champ magnétique.

La boule représente la Terre, le champ magnétique celui qui existe sur Terre.

Les particules des vents solaires arrivent à la Terre et sont déviés vers les pôles (doc. 4). Il y a alors formation d'aurores. C'est ce que Birkeland essaie de recréer avec son dispositif.

L'interaction entre le champ magnétique induit et les particules produisent des aurores. C'est l'interaction entre les particules de la haute atmosphère présentes grâce à la magnétosphère et les particules solaires (ici, le faisceau d'électrons). Du fait de l'excitation des atomes, il y a émission de photons, donc production de lumière.

4. Le champ magnétique terrestre dévie les vents solaires. Cela permet d'une part de diminuer l'envol des molécules de l'atmosphère, et d'autre part limite les effets ionisants de ces vents. Tout cela favorise le développement et le maintien de la vie sur Terre.

Suggestion de question supplémentaire :

5. Expliquer l'intérêt des modélisations réalisées en sciences.

En sciences, la réalisation de modélisations permet d'étudier des phénomènes naturels à l'échelle d'un laboratoire. Des systèmes naturels complexes peuvent ainsi être miniaturisés, ou des conditions présentes sur Terre il y a plusieurs milliards d'années recréées.

Sources/Bibliographie :

- Le dispositif expérimental de Terrella : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Terrella>.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

1. Indiquer quelle composition de l'atmosphère Stanley Miller essaie de reconstituer dans son expérience de 1953.

Miller place dans son globe des gaz supposés présents lors de la formation de la Terre, donc d'une composition proche de l'atmosphère primitive.

2. Doc. 1. Identifier à quoi peut correspondre, sur Terre, chacun des trois termes surlignés en jaune.

Les éléments de l'expérience de Miller font référence à :

- « Arcs électriques » : éclairs présents pendant un orage ;
- « Gaz » : gaz présents dans l'atmosphère primitive ;
- « Eau » : océan.

3. Proposer une interprétation à l'expérience de Miller à partir des résultats obtenus, sachant que les bases azotées et les acides aminés sont des constituants des êtres vivants.

Miller obtient des bases azotées et des acides aminés dans son expérience. Ces éléments sont des constituants majeurs des êtres vivants et on peut ainsi supposer que l'apparition de ces « briques élémentaires » a abouti à l'émergence des êtres vivants.

4. Indiquer ce que Kristian Birkeland tente de reproduire dans son expérience de Terrella.

Birkeland tente de créer un champ électromagnétique autour d'une boule aimantée représentant la Terre, afin de comprendre la formation des aurores boréales.

5. Expliquer l'effet du champ magnétique terrestre sur les vents solaires.

Le champ magnétique terrestre dévie les vents solaires qui n'atteignent ainsi majoritairement pas la surface de la Terre.