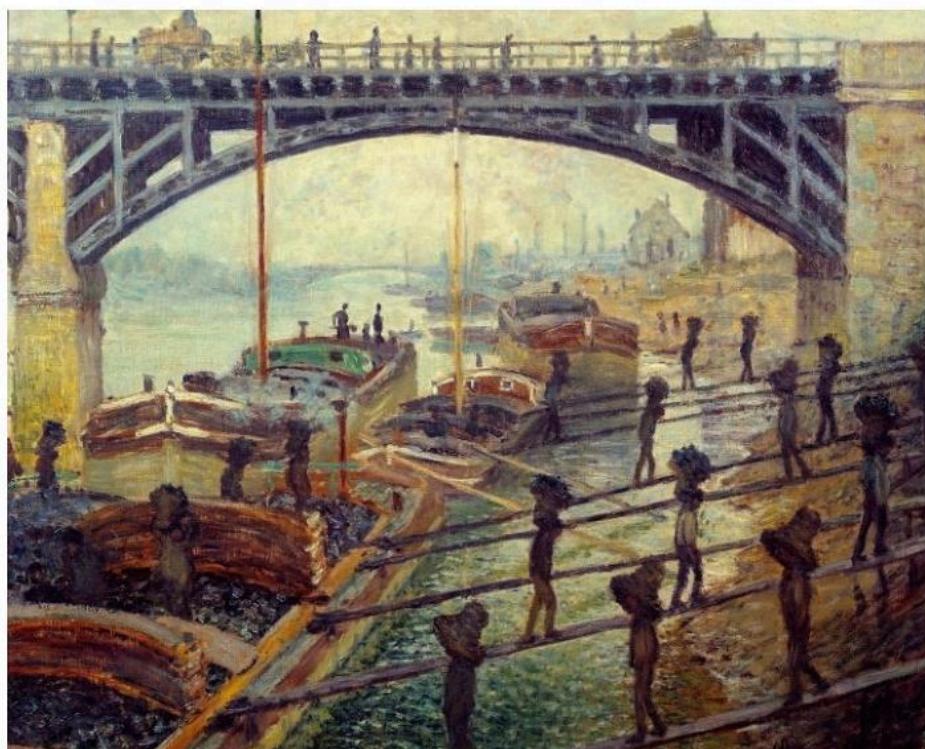


# 1

## THÈME SCIENCE, CLIMAT ET SOCIÉTÉ



**Les déchargeurs de charbon. Peinture de Claude Monet, 1875.** Ce tableau représente des ouvriers déchargeant du charbon sur les quais de Seine. Le charbon a été en effet le combustible le plus utilisé au XIX<sup>e</sup> siècle, lors de la révolution industrielle, augmentant notamment les émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines.

### HISTOIRE DES SCIENCES

- Où a commencé la première révolution industrielle de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle ?
- Quelle invention a permis la révolution industrielle ?

### ESPRIT CRITIQUE

- Sommes-nous en train de vivre à notre tour une révolution industrielle ?

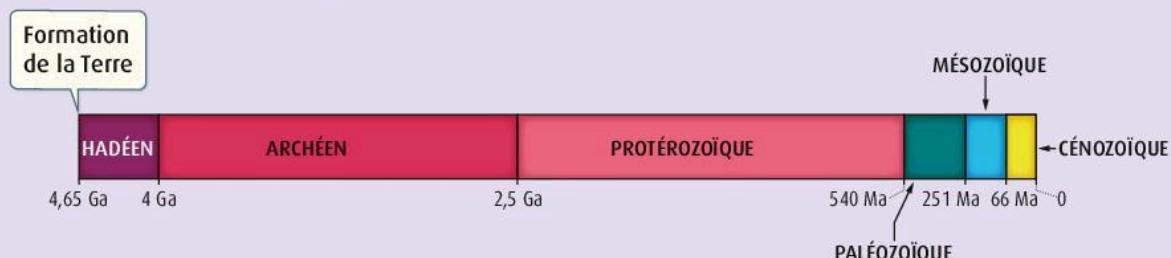


Des liens pour m'aider

## POUR BIEN COMMENCER

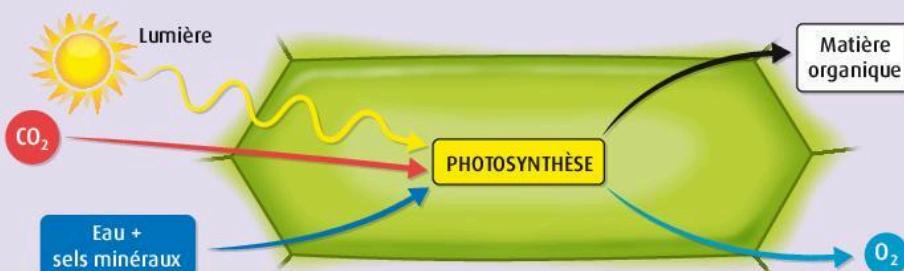
### Quelques notions déjà vues

#### SVT Cycle 4 Fraise chronologique de l'histoire de la Terre

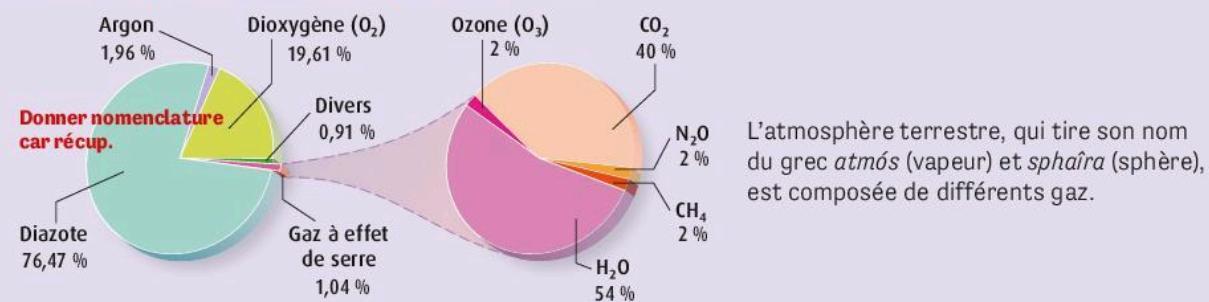


L'histoire de la Terre est divisée en ères en fonction des événements biologiques et géologiques.

#### SVT Cycle 4 Le bilan de la photosynthèse



#### ES 1<sup>re</sup> Composition de l'atmosphère terrestre



### Se tester avant de démarrer

Savez-vous répondre aux questions suivantes ?

1. Quelle méthode permet de déterminer la date de formation d'une roche ?
2. Quelles roches ont été étudiées pour permettre de dater la formation de la Terre ?
3. La formation de combustibles fossiles se fait-elle sur un temps relativement long ou court ?  
En présence ou en absence de  $\text{O}_2$  ?

Projet BARREL de la NASA. Ce ballon prend son envol depuis l'Antarctique jusqu'à la stratosphère. Ses capteurs lui permettent, entre autres, de mesurer les rayons X de la stratosphère.



# L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE ET LA VIE



Comment les facteurs physiques,  
géologiques et biologiques ont-ils influencé  
la composition de l'atmosphère terrestre  
depuis sa formation ?

# L'atmosphère et les océans de la « toute jeune Terre »

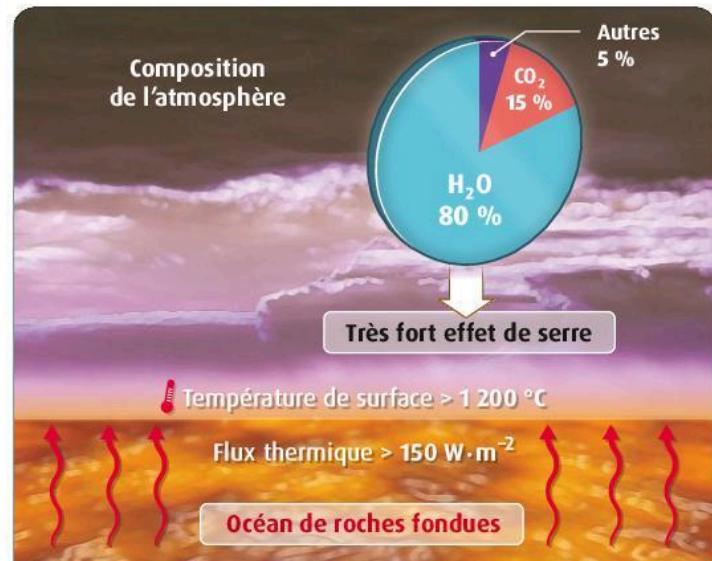
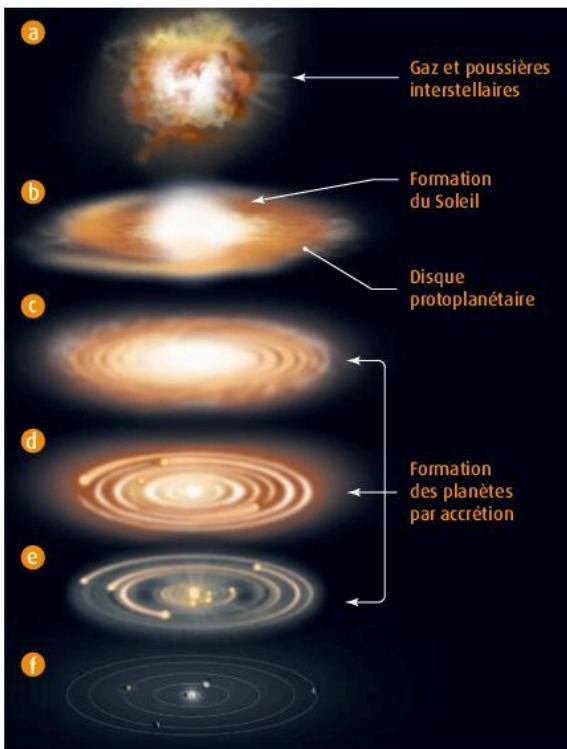
Le Soleil (notre étoile), la Terre et les autres éléments du système solaire se sont formés il y a 4,57 milliards d'années (Ga).

Quand et comment se sont formés l'atmosphère et les océans sur Terre ?



## DOC 1 La nébuleuse d'Orion.

La majorité des étoiles de cette nébuleuse sont entourées de disques sombres (photo en vignette): ce sont les disques protoplanétaires. Ils contiennent des gaz et des poussières interstellaires et sont le lieu de formation des planètes.



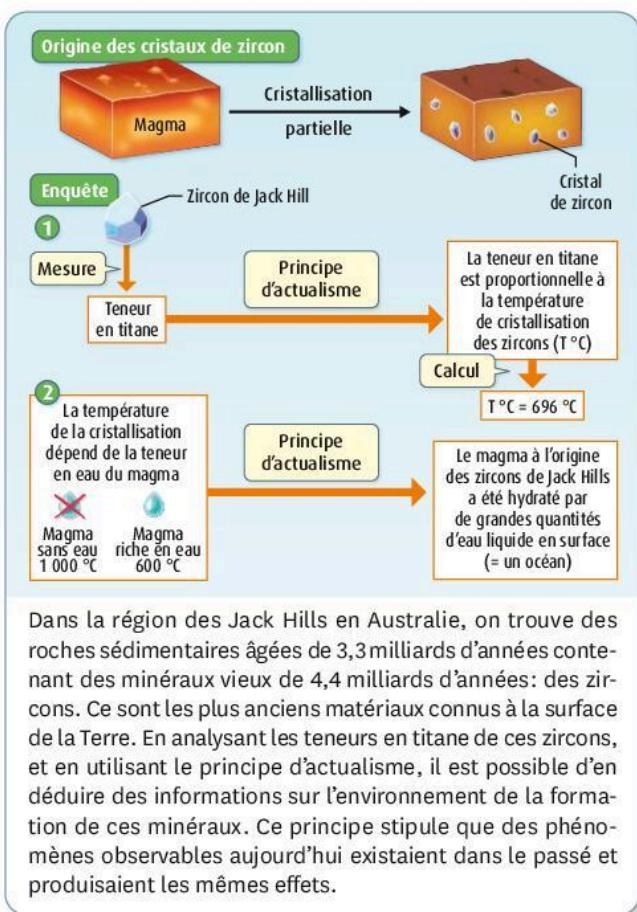
À sa naissance, la Terre avait une atmosphère héritée du disque dans lequel s'est formé le système solaire. La Terre étant petite et proche du Soleil, les gaz les plus légers de cette atmosphère primitive (H et He) ont dû rapidement s'échapper. L'atmosphère s'est alors concentrée en d'autres molécules (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, d'origine volcanique en particulier) et a pu être modifiée par des apports météoritiques et cométaires.

Lors de l'accrétion, l'énergie mécanique des poussières en mouvement s'est convertie en énergie thermique. La dissipation de cette énergie a été à l'origine d'un flux d'énergie thermique très intense sur la jeune Terre.

## DOC 3 Quelques caractéristiques de la Terre peu après sa formation.

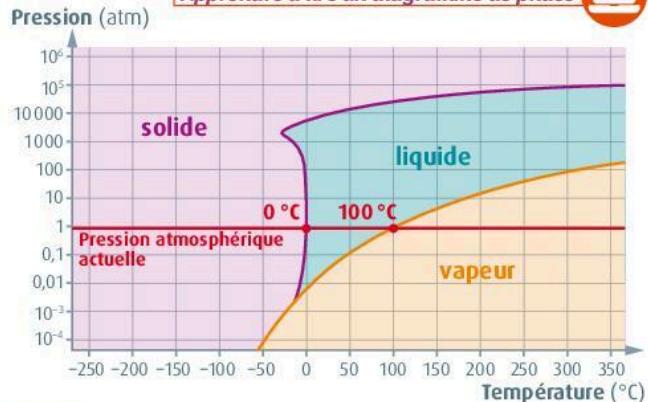


**DOC 4** Cristal de zircon (vignette) trouvé dans les roches des collines de Jack Hills, en Australie (photo). Les zircons sont des minéraux très résistants. Ce sont les plus vieux matériaux terrestres connus à ce jour.

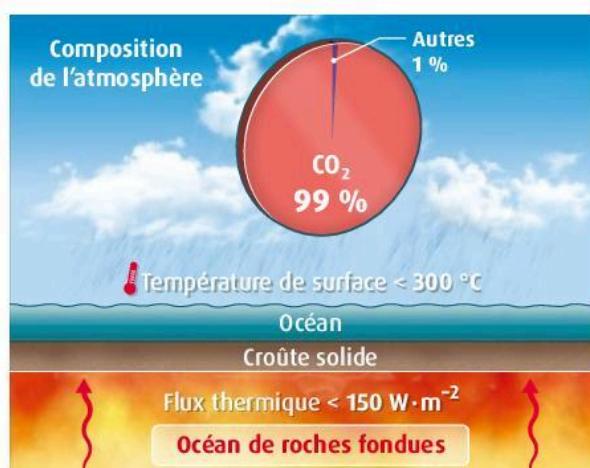


Dans la région des Jack Hills en Australie, on trouve des roches sédimentaires âgées de 3,3 milliards d'années contenant des minéraux vieux de 4,4 milliards d'années : des zircons. Ce sont les plus anciens matériaux connus à la surface de la Terre. En analysant les teneurs en titane de ces zircons, et en utilisant le principe d'actualisme, il est possible d'en déduire des informations sur l'environnement de la formation de ces minéraux. Ce principe stipule que des phénomènes observables aujourd'hui existaient dans le passé et produisaient les mêmes effets.

### Apprendre à lire un diagramme de phase



**DOC 5** Diagramme de phase de l'eau. Ce diagramme de phase présente l'état de l'eau selon les conditions de pression et de température. Il y a 4,4 Ga, la pression atmosphérique était sans doute comprise entre 39 et 207 atm.



Une partie de l'énergie thermique issue de l'accrétion ayant été dissipée, le flux d'énergie thermique interne diminue. Cela permet une baisse de la température de surface et la formation d'une croûte solide à la surface de l'océan de roches fondues.

**DOC 7** Quelques caractéristiques de la Terre 150 millions d'années après sa formation.

**DOC 6** Enquête sur les cristaux de zircon de Jack Hills.

## EXPLOITER LES DOCUMENTS TÂCHE COMPLEXE

À partir des données de la double page, dressez un « portrait robot » des principales caractéristiques de la Terre depuis de sa formation jusqu'à l'âge +150 millions d'années.

Vous présenterez vos données par exemple sous la forme d'un tableau.



## ESPRIT CRITIQUE

Il y a plus de 4 milliards d'années, aucun scientifique n'était capable de faire des mesures sur Terre.

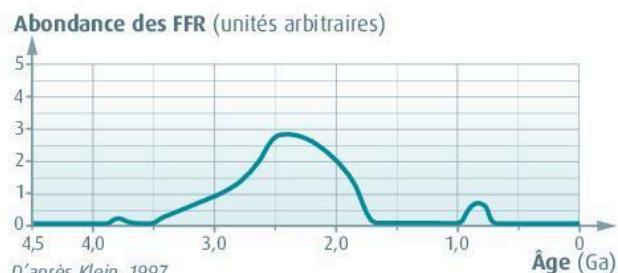
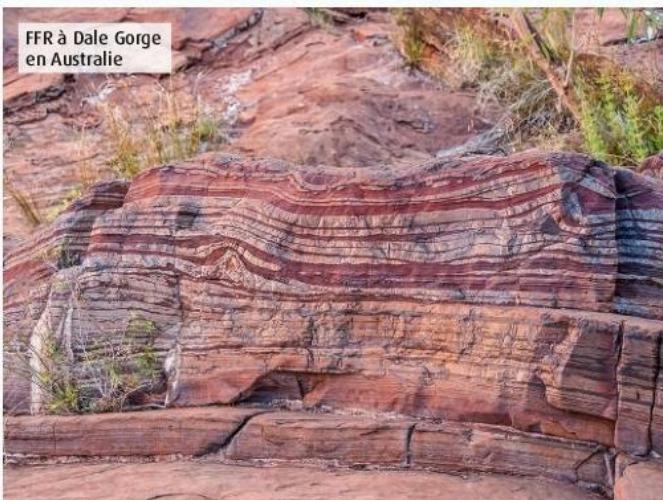
→ À partir des exemples de la double page, montrez que les reconstitutions des premiers millions d'années de la Terre relèvent de la science et non de la science-fiction.

Pistes de travail ► DOCS 2, 5 et 6

## Le dioxygène atmosphérique : un déchet du vivant

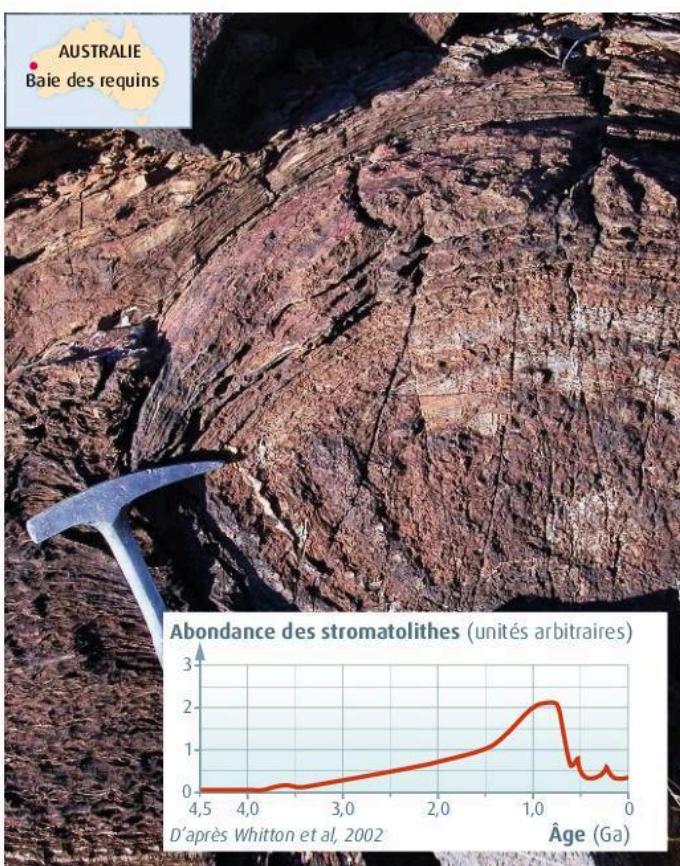
Le dioxygène O<sub>2</sub> constitue 21 % de l'atmosphère actuelle. Pourtant, il était probablement absent de l'atmosphère primitive de la Terre. Des indices géologiques nous permettent de retracer l'histoire du dioxygène atmosphérique.

Quand et comment le dioxygène atmosphérique est-il apparu ?

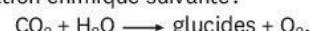


Les formations de fer rubanées (FFR) sont constituées de successions de couches claires de silice et de couches rougeâtres d'hématite (**DOC. 4**). L'alternance des dépôts à l'origine de ces couches pourrait s'expliquer par une variation de l'activité biologique (par exemple sous l'effet des saisons ou de modification des paramètres astronomiques influençant le climat).

**DOC 1** Des formations de fer rubanées (FFR) âgées de 2,45 milliards d'années.



Les stromatolithes sont des structures en boule formées par l'activité de bactéries photosynthétiques : les cyanobactéries. La photosynthèse permet à ces bactéries de produire leur matière organique à partir de matière minérale et d'énergie lumineuse selon la transformation chimique suivante :



Les stromatolithes contemporains et fossiles ont des morphologies similaires.

**DOC 2** Stromatolithe fossile du Pilbara (Australie), vu en coupe et âgé de 2,7 milliards d'années. La courbe représente l'abondance des stromatolithes depuis la formation de la Terre.

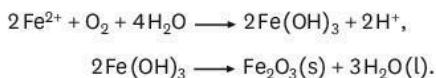
**DOC 3** Stromatolithes actuels dans la baie des requins (Australie).

**Activité expérimentale**

En milieu aérien, l'hématite est présente dans la rouille. Elle se forme à partir du fer métallique et du dioxygène :

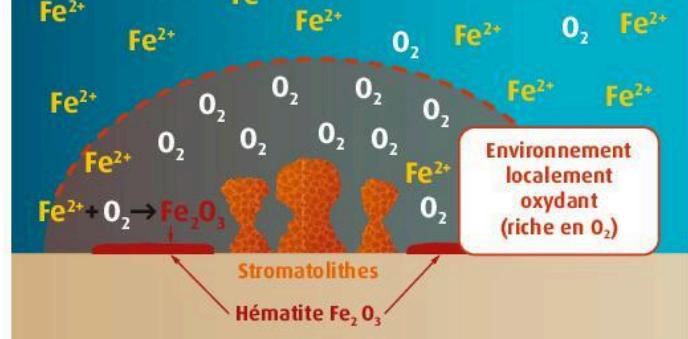


L'hématite est ainsi un produit d'oxydation du fer : c'est un oxyde de fer III. Dans les océans, le fer est sous forme d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  solubles dans l'eau. Au contact de dioxygène, il se forme de l'oxyde de fer III, insoluble dans l'eau :



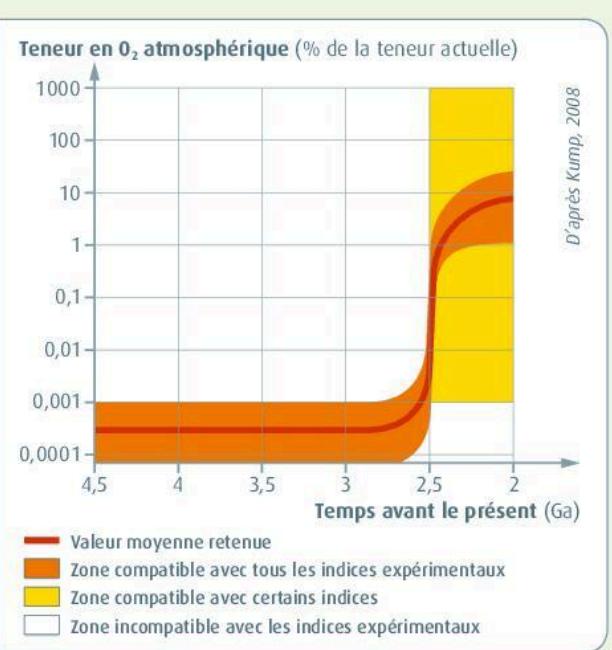
D'où proviennent les ions  $\text{Fe}^{2+}$  ?

En l'absence de dioxygène atmosphérique, l'altération des roches continentales produit des ions  $\text{Fe}^{2+}$ , solubles dans l'eau. Ils gagnent l'océan après lessivage par les précipitations. Mais si l'atmosphère contient du dioxygène, l'altération des roches forme l'ion  $\text{Fe}^{3+}$ , totalement insoluble. Il n'y a alors plus d'apport de fer à l'océan.

**DOC 4 L'origine des formations de fer rubanées.**

Les données géologiques montrent que le dioxygène s'est accumulé dans l'atmosphère à partir de 2,4 milliards d'années (Ga) avant le temps présent. La seule source capable de fournir un tel volume de ce gaz est la photosynthèse. D'après les archives fossiles, celle-ci a été réalisée par des cyanobactéries, dont les stromatolithes témoignent de l'activité. Or les plus vieux stromatolithes fossiles incontestés sont âgés de 2,7 Ga et on connaît des structures âgées de 3,5 Ga qui sont très probablement des restes de stromatolithes. Il s'est donc écoulé de 300 millions à 1,1 milliard d'années entre le démarrage de la photosynthèse et l'oxygénéation de l'atmosphère. Ce délai s'explique notamment par le fait que l' $\text{O}_2$  produit par photosynthèse a d'abord oxydé les ions  $\text{Fe}^{2+}$  dans l'océan. Les formations ferreuses rubanées sont un témoignage de cette oxydation.

Notons que les plus anciens fossiles de stromatolithes ne datent pas les origines de la vie sur Terre. Le métabolisme des bactéries qui les ont construits témoigne d'une histoire évolutive déjà longue. Par ailleurs, le dioxygène lui-même n'est pas nécessaire à l'existence d'organismes vivants : on connaît aujourd'hui de nombreuses espèces de micro-organismes qui peuvent se développer sans dioxygène. C'était probablement aussi le cas des premières formes de vie.

**DOC 5 Estimations de l'évolution de la teneur en  $\text{O}_2$  de l'atmosphère terrestre entre 4,5 et 2 milliards d'années avant le temps présent.****EXPLOITER LES DOCUMENTS TÂCHE COMPLEXE**

Expliquez par quels processus l'atmosphère terrestre s'est enrichie en dioxygène. Vous pourrez réaliser un diagramme décrivant des enchaînements de causes et de conséquences ou bien vous rédigez un texte.

Dans chaque cas, vous mentionnerez les formations de fer rubanées.

**ESPRIT CRITIQUE**

D'une équipe de chercheurs à l'autre, les estimations de caractéristiques anciennes de la Terre peuvent varier d'un facteur 10. Comment leur accorder de la crédibilité ?

→ Vous répondrez à cette question en montrant comment l'incertitude est prise en compte par la démarche scientifique.

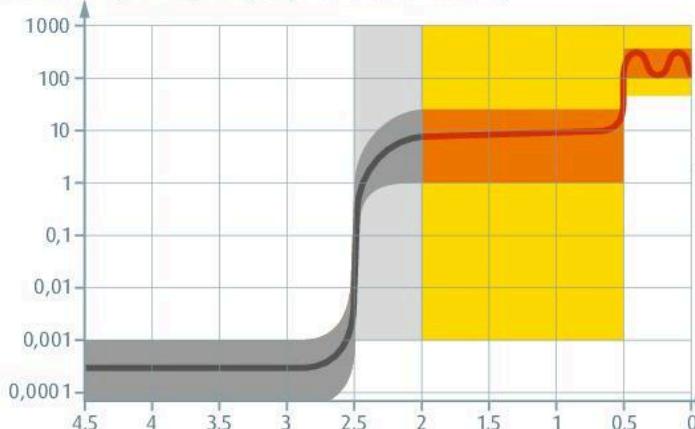
Pistes de travail ► DOC. 5 et DOC. 4 p. 69

# Le devenir du dioxygène atmosphérique

L'atmosphère terrestre s'est enrichie en dioxygène il y a 2,5 milliards d'années. Ce gaz provient de l'activité photosynthétique.

Que deviennent les molécules de dioxygène une fois qu'elles ont gagné l'atmosphère ?

Teneur en O<sub>2</sub> atmosphérique (% de la teneur actuelle)



**DOC 1 Évolution de la concentration atmosphérique en O<sub>2</sub> depuis 4,5 milliards d'années.** La teneur atmosphérique d'un gaz dépend de l'équilibre entre sa production et sa destruction ou sa consommation. L'augmentation observée il y a 500 millions d'années n'est pas, à ce jour, expliquée par les scientifiques, mais pourrait venir d'un développement massif de la végétation terrestre aérienne.

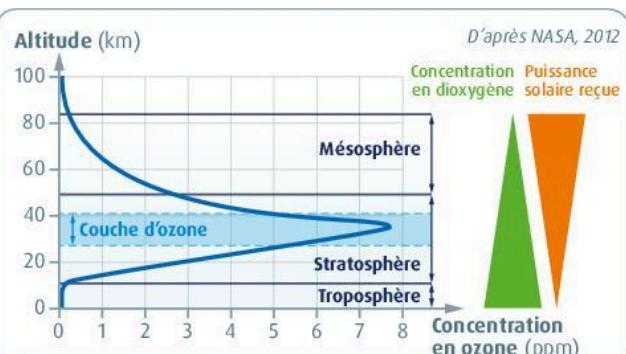


La respiration est une oxydation de la matière organique en présence de dioxygène. Elle procure de l'énergie utilisable pour le fonctionnement de nombreux organismes: plantes, animaux et champignons notamment. Elle est modélisée par l'équation suivante:

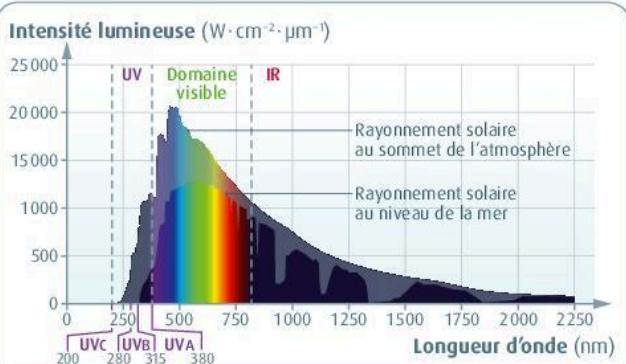


En première approche, la combustion de la matière organique peut être représentée par la même équation que la respiration, bien que les transformations chimiques en jeu soient différentes.

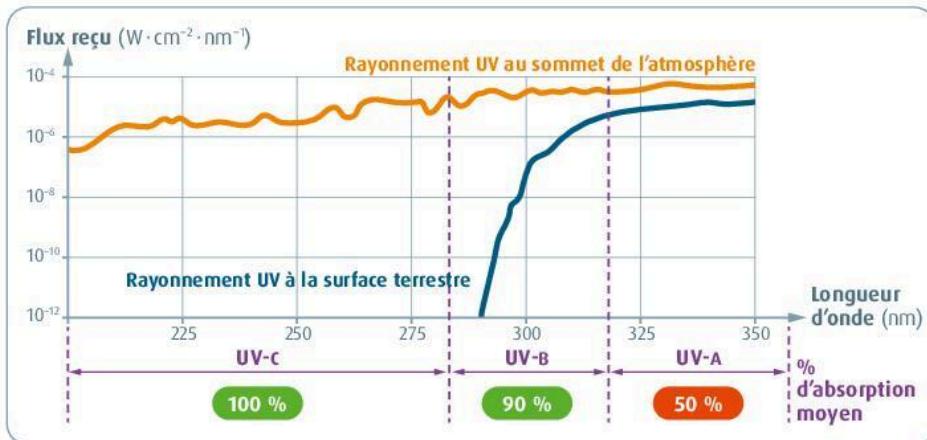
**DOC 2 Respiration et combustion.**



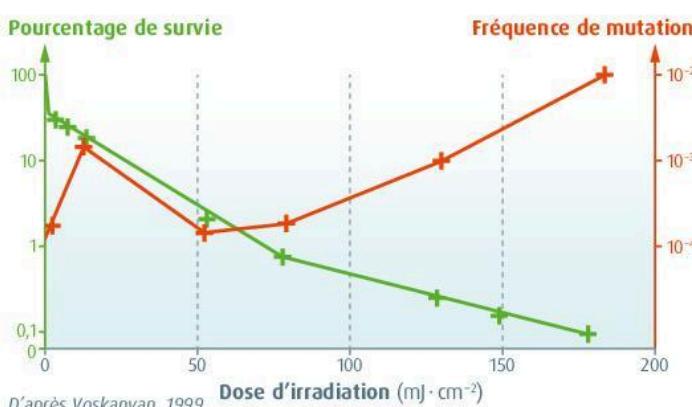
**DOC 3 Évolution de la concentration en ozone en fonction de l'altitude.** Dans les hautes couches de l'atmosphère, vers 30 km d'altitude (stratosphère), l'énergie solaire reçue est suffisante pour provoquer la transformation du dioxygène en ozone, que l'on représente par l'équation suivante:



**DOC 4 Spectre de la lumière solaire.** Plus la longueur d'onde du rayonnement est faible, plus l'énergie qu'il transporte est importante.



**DOC 6** Absorption des différentes longueurs d'onde par l'ADN.  
Lorsque l'ADN absorbe l'énergie d'origine lumineuse, il est susceptible d'être modifié chimiquement. C'est ce qu'on appelle une mutation.



Chez les humains, l'exposition aux UV (cabines de bronzage par exemple) occasionne un risque accru de cancer de la peau.



#### ESPRIT CRITIQUE

**Interview de Guillaume Lecointre, professeur du Muséum national d'Histoire naturelle**

L'ozone absorbe exactement les longueurs d'ondes qui endommagent le plus l'ADN. Ce qui pourrait donner l'impression, en première approche, que l'ozone a été « créé pour permettre la vie ». On peut au contraire, dans une approche scientifique, constater que les organismes dont l'ADN (ou une molécule jouant le même rôle) étaient trop violemment altérés par les radiations solaires arrivant à la surface de la Terre ne sont pas parvenus jusqu'à nous. Les formes de vie qui nous entourent sont plus ou moins adaptées à leur environnement à des degrés variés, sinon elles ne seraient pas là.

#### DOC 8 Pourquoi la nature semble « si bien faite » ?

### EXPLOITER LES DOCUMENTS TÂCHE COMPLEXE

Décrivez différents exemples de relations qui lient le vivant et le dioxygène atmosphérique.  
Vous rédigerez un texte argumenté (une relation correspondra à un paragraphe).



#### ESPRIT CRITIQUE

On entend parfois dire: « Le vivant est tellement bien fait qu'il ne peut pas être le fruit du hasard. »

→ Montrez que cette objection est scientifiquement fausse en utilisant vos connaissances sur l'évolution et la sélection naturelle.

Pistes de travail ► DOC. 8

# Le cycle du carbone à la surface de la Terre

Le CO<sub>2</sub> n'est qu'une des formes du carbone sur notre planète.

Où trouve-t-on du carbone sur Terre et comment se réalisent les échanges de carbone ?



**DOC 1** Les falaises d'Étretat en Normandie.

## Mots-clés

- Réservoirs de carbone:** différents compartiments dans lesquels le carbone est stocké.
- Stock de carbone:** quantité de carbone dans un réservoir, exprimée en milliards de tonnes de carbone (GtC). Elle est indiquée en bleu dans les docs 1, 2 et 3.

Les combustibles fossiles sont formés à partir de la matière organique d'être vivants photosynthétiques (algues, végétaux terrestres) préservés de la dégradation après leur mort. Cette matière est issue du CO<sub>2</sub> prélevé dans le réservoir atmosphérique.

Bilan de la photosynthèse
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + énergie solaire → biomasse + O <sub>2</sub>
Combustibles fossiles: 10000 GtC
Atmosphère: 720 GtC

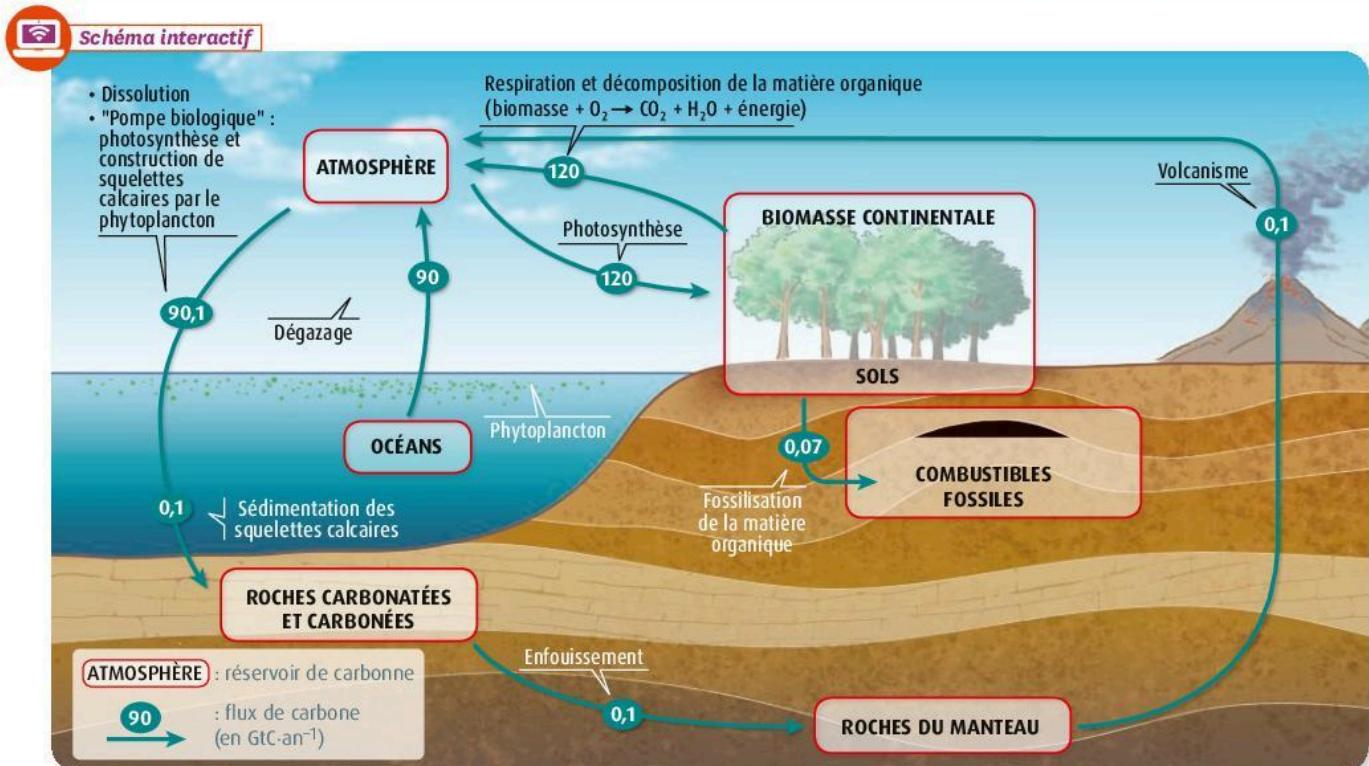


**DOC 2** Puits de pétrole.



La couleur noire du sol des tourbières vient de l'abondance de matière organique morte présente dans le sol. Sans être aussi riches en carbone que les tourbières, les autres sols contiennent un important stock de carbone. Les plantes chlorophylliennes et tous les êtres vivants continentaux stockent également du carbone.

**DOC 3** Tourbière dans les Shetland (Écosse).



**DOC 4** **Le cycle naturel du carbone.** Il correspond aux différents réservoirs de carbone et aux échanges qui opèrent entre eux. Ces échanges sont à l'origine de flux de carbone, mesurés en GtC échangés par an.



Depuis plus de 150 ans, les humains utilisent la combustion du pétrole et d'autres combustibles fossiles (charbon ou gaz) pour obtenir de l'énergie. Cette combustion leur permet de déplacer des voitures, des camions, des bateaux ou des avions, de faire fonctionner des machines-outils ou des centrales électriques, etc. On estime que les humains ont consommé environ la moitié des stocks de pétrole exploitables, alors que la formation de ce combustible prend plusieurs dizaines de millions d'années.

#### ESPRIT CRITIQUE

Production d'électricité, de chaleur et autres productions d'énergie	4,7 GtC/an
Agriculture forêt et autre usages des sols	3,2 GtC/an
Construction (cimenterie)	0,9 GtC/an
Transport	1,9 GtC/an
Industrie	2,8 GtC/an

**DOC 6** Flux de carbone vers l'atmosphère liés aux activités humaines. Voir aussi **DOC. 2** p. 70.

**DOC 5** Combustion de pétrole par des voitures individuelles.

#### EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Réalisez, sous forme d'un schéma, un cycle simplifié du carbone en présentant d'un côté les processus qui consomment du CO<sub>2</sub> atmosphérique et de l'autre ceux qui en produisent. Vous inclurez les flux liés aux humains.
- Donnez le volume des réservoirs de carbone figurés sur le **DOC. 4** (**DOCS 1 à 3**).
- Établissez une liste des différentes activités humaines interférant avec le cycle du carbone.
- Donnez un ou des exemples montrant que certains phénomènes peuvent être décrits à des échelles moléculaire, individuelle ou planétaire.

#### ESPRIT CRITIQUE

L'agence internationale de l'énergie prédit un épuisement des combustibles fossiles dans moins d'un siècle.

→ Cette prévision correspond-elle aux données de la double page ? Comment expliquer cette différence ?

Pistes de travail ► **DOCS 2 et 6**



# L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE ET LA VIE

## **1. L'atmosphère et les océans de la toute jeune Terre**

► La Terre a été formée simultanément à l'ensemble du système solaire il y a environ 4,55 Ga. Les modèles de formation de la Terre et les indices étudiés dans les roches les plus anciennes permettent d'imaginer les conditions physico-chimiques régnant sur Terre quelques dizaines de millions d'années après sa formation.

► L'atmosphère primitive de la Terre contenait principalement de l'eau, du dioxyde de carbone et du diazote. L'eau dominait dans l'atmosphère sous forme de vapeur. En effet, la chaleur importante résultant de la formation de la Terre empêchait sa condensation. L'étude de zircons de 4,4 Ga permet de déterminer que ces minéraux se sont formés dans un environnement riche en eau liquide. Avec la dissipation de la chaleur, l'eau atmosphérique s'est en effet condensée, formant ainsi l'hydrosphère dans laquelle s'est développée la vie. > **Unité 1**

## 2. Le dioxygène : un déchet du vivant

► L'atmosphère primitive ne contenait pas de dioxygène. Des **formations de fer rubanées** indiquent pourtant que le  $\text{Fe}^{2+}$  accumulé dans les océans en l'absence de dioxygène a commencé à être oxydé en  $\text{Fe}^{3+}$  autour de 3,5 Ga. C'est aussi la date des plus anciennes formations que l'on peut attribuer à une activité biologique : les **stromatolithes**. Par leur métabolisme photosynthétique, des cyanobactéries ont produit du dioxygène qui a oxydé les espèces chimiques réduites de l'océan, comme  $\text{Fe}^{2+}$ . Le dioxygène s'est ensuite accumulé dans l'atmosphère à partir de 2,4 Ga pour atteindre sa concentration actuelle il y a 0,5 Ga environ. > **Unité 2**

### **3. Le devenir du dioxygène atmosphérique**

► Le dioxygène est aujourd’hui toujours produit par photosynthèse (source de O<sub>2</sub>) et consommé par tous les organismes réalisant la respiration (puits de O<sub>2</sub>). La combustion de la biomasse est aussi un puits de O<sub>2</sub>.

► Sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, le dioxygène de la stratosphère se convertit partiellement en ozone ( $O_3$ ) formant une couche dont la concentration maximale est située à environ 30 km d'altitude. L'ozone absorbe une partie du rayonnement solaire, notamment les ultra-violets. Compte tenu de l'effet délétère des ultra-violets sur l'ADN, la **couche d'ozone** joue un rôle de filtre protégeant les organismes des effets mutagènes de la lumière solaire. > **Unité 3**

## **4. Le cycle du carbone à la surface de la Terre**

► Le cycle du carbone est décrit par un ensemble de **réservoirs** (atmosphère, sols, océans, biosphère et roches) échangeant des **flux de carbone**. Le principal réservoir est constitué par des roches sédimentaires (roches carbonatées et roches carbonées) qui, lors de leur formation ancienne, ont contribué à diminuer la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Si le bilan carboné de la photosynthèse et de la respiration est nul, les activités humaines émettent du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère. Ce carbone provient de combustibles fossiles, formés il y a plusieurs dizaines ou centaines de millions d'années, qui ne se renouvellent pas assez vite pour que les stocks se reconstituent : ces ressources sont dites non renouvelables. > **Unité 4**

## **Les mots-clés du chapitre**

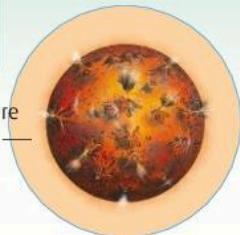
- **Zircon** : Minéral très résistant, plus vieux matériau terrestre connus à ce jour.
  - **Formation de fer rubanée** : Roche constituée de successions de couches claires de silice et de couches rougeâtres d'hématite (oxyde de fer III).
  - **Stromatolithe** : formation rocheuse calcaire formée par l'activité de bactéries photosynthétiques, les cyanobactéries.
  - **Couche d'ozone** : Partie de la stratosphère comportant une concentration plus importante d'ozone.
  - **Réservoir de carbone** : Compartiment terrestre stockant du carbone sous différentes formes moléculaires. Sur Terre, il y a quatre réservoirs de carbone : l'atmosphère, la biosphère, l'hydroosphère et le réservoir géologique (les roches).
  - **Flux de carbone** : masse de carbone transférée par unité de temps d'un réservoir de carbone à un autre.

#### **| Ne pas confondre**

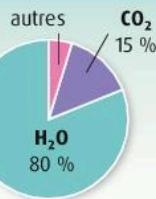
- Les **roches carbonées** contiennent du carbone en proportion variée, issu de la transformation de la matière organique (ex: charbon, pétrole...).
  - Les **roches carbonatées** sont formées au fond des océans par sédimentation de restes calcaires (comme  $\text{CaCO}_3$ : carbonate de calcium) d'algues microscopiques.

***l'essentiel par l'image*****Schéma interactif****L'atmosphère terrestre et la vie****Âge de la Terre****< 100 millions d'années**

Effet de serre important



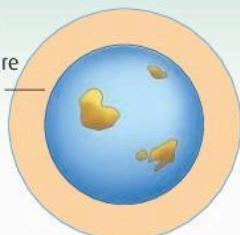
- Atmosphère →
- Surface → Roches en fusion + > 1 200 °C



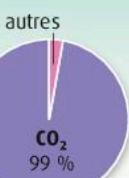
- Présence de vie → Aucun indice

**≈ 150 millions d'années**

Effet de serre important



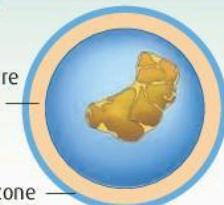
- Atmosphère →
- Surface → Océan + continents + < 300 °C



- Présence de vie → Aucun indice

**2 à 3 milliards d'années**

Effet de serre plus faible

Couche d'ozone (O<sub>3</sub>) protectrice

- Formation de roches carbonatées → CO<sub>2</sub> atmosphérique
- Plus vieux indices de la présence de vie ≈ 3,5 milliards d'années
- Activité de bactéries photosynthétiques → O<sub>2</sub> atmosphérique + formation d'ozone O<sub>3</sub>  
Stromatolithes

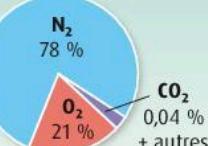
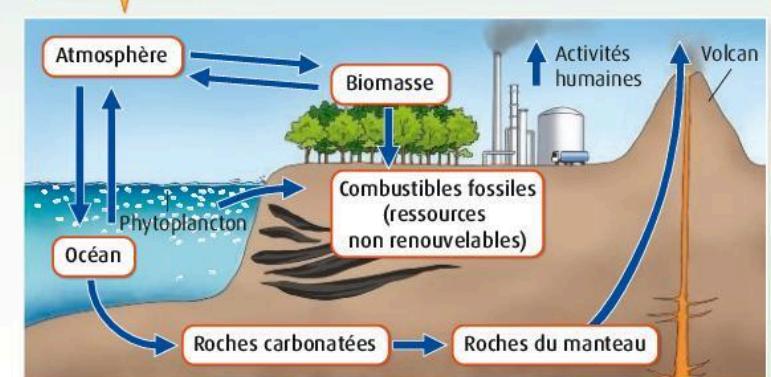
**4,5 milliards d'années**

Effet de serre modéré

Couche d'ozone



- Atmosphère →
- Surface → ≈ 15 °C

**Cycle du carbone**

= Réservoir = stock de carbone

= Flux = circulation de carbone entre réservoirs

## Mémoriser son cours

Exercices corrigés



**Pour mémoriser l'essentiel du cours, posez-vous régulièrement ces questions et vérifiez vos réponses.**

1. Quelle était la composition de l'atmosphère peu après la formation de la Terre puis 150 millions d'années plus tard?
2. Comment a évolué la proportion de dioxygène atmosphérique au cours de l'histoire de la Terre? Comment le sait-on?
3. Quelle est l'origine et l'importance de la couche d'ozone pour la vie sur Terre?
4. Savez-vous dessiner schématiquement le cycle du carbone et comparer l'ordre de grandeur des principaux réservoirs?

Exercices interactifs corrigés



## Pour s'échauffer

### 1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

**1. Sur la Terre juste après sa formation:**

- a. la température est telle qu'il n'y a pas d'océan d'eau liquide à sa surface.
- b. la surface terrestre est plus froide qu'aujourd'hui.
- c. les concentrations en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau sont responsables d'un très fort effet de serre.
- d. la vie est probablement possible.

**2. 150 millions d'années après la formation de la Terre:**

- a. les océans d'eau liquide n'étaient pas formés.
- b. l'atmosphère contenait principalement du dioxyde de carbone.
- c. la surface était constituée de roches fondues.
- d. l'effet de serre était probablement encore très fort.

**3. Le dioxygène de l'atmosphère terrestre:**

- a. a principalement une origine biologique.
- b. a été présent dès la formation la Terre.
- c. a vu sa proportion dans l'atmosphère globalement diminuer.
- d. est consommé lors de la respiration des êtres vivants.

**4. L'ozone atmosphérique:**

- a. est en partie responsable de fait que rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère diffère du rayonnement solaire mesuré au niveau de la mer.
- b. est un gaz dérivé du dioxygène.
- c. est plus concentré dans les basses altitudes de l'atmosphère.
- d. protège la surface terrestre des ultraviolets les moins énergétiques.

**5. Concernant les réservoirs de carbone sur Terre:**

- a. le principal réservoir de carbone sur Terre est l'atmosphère.
- b. la biomasse continentale et l'atmosphère contiennent les mêmes ordres de grandeur de carbone.
- c. la formation des roches carbonatées est responsable de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique.

- d. les humains peuvent puiser dans les réservoirs de carbone pour leurs activités.

**6. Concernant les flux de carbone entre réservoirs:**

- a. les flux de carbone de la respiration et de la photosynthèse s'annulent à l'échelle mondiale.
- b. les océans absorbent du carbone atmosphérique mais n'en rejettent pas.
- c. le volcanisme contribue à éléver le dioxyde de carbone atmosphérique.
- d. le bilan du cycle naturel du carbone est quasiment nul aux courtes échelles de temps.

**7. D'après la courbe ci-dessous, on peut dire que:**

- a. il y a des incertitudes concernant la teneur en dioxygène de l'atmosphère passée de la Terre.

- b. que les cyanobactéries ont consommé le dioxygène atmosphérique.

- c. les estimations de la concentration atmosphérique en dioxygène peuvent varier d'un facteur 10.

- d. la concentration atmosphérique en dioxygène il y a deux milliards d'années était d'environ 25 % de la concentration actuelle.



**8. Le principe d'actualisme:**

- a. permet de faire des scénarios concernant des événements qui ont affecté la Terre.
- b. est très utilisé en géologie.
- c. est fondé sur des prédictions de phénomène qui auront lieu dans le futur.
- d. implique que les conditions physico-chimiques passées et actuelles sur Terre étaient identiques.

► CORRECTION p. 316

## 2 Qui suis-je ?

- Le plus ancien minéral connu sur Terre.
- Une représentation des différentes phases de l'eau en fonction des conditions de pression-température.
- Le gaz le plus important en proportion de l'atmosphère actuelle.
- Un gaz atmosphérique protégeant la surface de la Terre d'une partie des rayons ultra-violets solaires.
- Un gaz atmosphérique produit par les organismes photosynthétiques.
- La principale forme atmosphérique du carbone.
- Une roche riche en carbone exploitée pour sa capacité à brûler.

## 3 Réponse courte à partir de documents



**Question:** Ces vues d'artiste représentent la Terre primitive à deux âges différents. En vous aidant des indices visibles sur ces images, datez approximativement les époques représentées.

## 4 Calculs

La concentration massique du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans l'atmosphère en 2019 était de 410 parties par million (ppm), soit 0,0410%. La masse d'une mole de dioxyde de carbone est de 44 grammes et la masse volumique de l'air au niveau de la mer et à une température de 20°C est de  $1200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

- Calculez la masse de  $\text{CO}_2$  contenue dans 1  $\text{m}^3$  d'air.
- Calculez le nombre de moles de  $\text{CO}_2$  contenues dans 1  $\text{m}^3$  d'air.
- On rappelle que le nombre d'entités dans une mole vaut  $6,02 \times 10^{23}$ . Calculez le nombre de molécules de  $\text{CO}_2$  contenues dans 1  $\text{m}^3$  d'air.

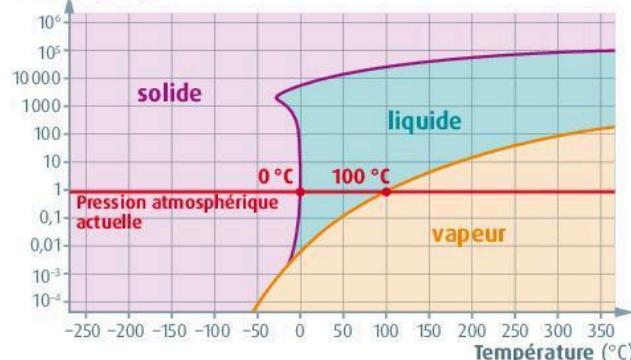
## 5 Argumentation

L'incorporation du carbone dans les roches carbonatées est le principal processus qui « pompe » le dioxyde de carbone atmosphérique à l'échelle des temps géologiques. Le flux annuel de carbone vers le réservoir des roches carbonatées est de  $0,1 \text{ GtC} \cdot \text{an}^{-1}$  (GtC : milliard de tonnes de carbone). Les activités humaines sont à l'origine d'un flux de carbone vers l'atmosphère de  $13,5 \text{ GtC} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- Calculez le temps qui sera nécessaire pour « pomper » le  $\text{CO}_2$  émis par les activités humaines pendant 10 ans.
- Que pouvez-vous en conclure ?

## 6 Réponse courte à partir d'un document

Pression (atm)



**DOC 1** Diagramme de phase de l'eau.

	Température moyenne de surface	Pression atmosphérique moyenne
Mars	-63 °C	0,006 atm
Vénus	470 °C	93 atm

**DOC 2** Quelques caractéristiques de Mars et Vénus.

- Au sommet du Mont Blanc la pression atmosphérique est d'environ 0,43 atm, soit 43 % de la pression atmosphérique au niveau de la mer. Donnez un encadrement de la température d'ébullition de l'eau à cet endroit.
- Sous quelle forme est-il probable de trouver de l'eau sur Mars? Justifiez en vous appuyant sur le diagramme de phase de l'eau.

## 7 Raisonnez

À de rares exceptions près, l'âge des plus récentes formations de fer rubanées connues est proche de 1 milliard d'années. Ces roches se forment en milieu océanique à partir d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  issus du lessivage des continents. En présence de dioxygène atmosphérique, les ions  $\text{Fe}^{2+}$  sont oxydés en ions  $\text{Fe}^{3+}$  insolubles.

**Question:** À partir des données de l'énoncé et de vos connaissances, expliquez l'absence de formations de fer rubanées depuis environ 1 milliard d'années.

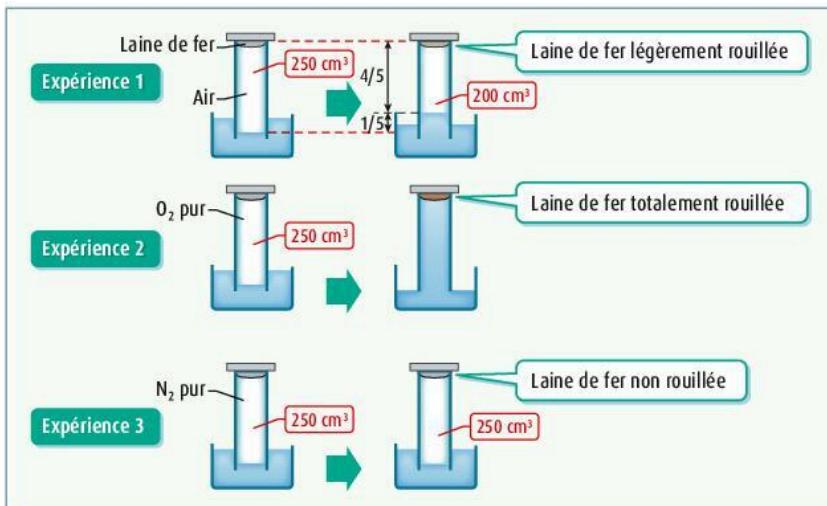


**DOC 1** Des formations de fer rubanées.

### 8 Tirer des conclusions d'une expérience

#### La formation de la rouille

La rouille se forme à partir du fer (ou d'alliage contenant du fer comme l'acier). On cherche à comprendre le rôle de l'eau et de l'atmosphère dans la formation de la rouille à partir du fer. On place pour cela de la laine de fer dans une éprouvette humidifiée retournée sur de l'eau. Cette dernière a été préalablement bouillie pour retirer tous les gaz dissous qu'elle pouvait contenir. On réalise alors trois expériences schématisées ci-dessous.



**DOC 1 Les expériences et leurs résultats.** L'éventuelle remontée du liquide dans l'éprouvette après quelques jours s'explique par la consommation d'une entité chimique qui se trouvait dans le gaz au début de l'expérience.

Utilisez des phrases commençant par exemple par: « On constate... ». À ce stade, ne pas interpréter les résultats obtenus.

#### QUESTIONS

1. Expliquez ce que cette expérience permet de tester.
2. Décrivez les résultats obtenus.
3. Interprétez les résultats et concluez sur les conditions favorables à la formation de la rouille à partir du fer.

Présentez les objectifs de l'expérience, éventuellement le dispositif permettant de les atteindre. Ici, on peut se demander pourquoi l'expérimentateur a choisi de comparer trois situations.

Interprétez les résultats. On peut par exemple utiliser des phrases commençant par: « On en déduit... ». Si des connaissances complémentaires sont nécessaires, le préciser avec des phrases commençant par exemple par: « Sachant que... ».

#### RÉSOLUTION

1. Dans chaque montage, la laine de fer est en contact avec un gaz de composition différente. Cette expérience permet donc d'étudier le rôle de différents gaz dans la formation de la rouille.

2. Dans l'expérience 1, on constate que la laine de fer est légèrement rouillée et que le niveau d'eau a monté de 50 cm<sup>3</sup>. Un gaz représentant 1/5<sup>e</sup> du volume de l'air a donc été consommé. Dans l'expérience 2, la laine de fer est rouillée et l'eau remplit toute l'éprouvette. Tout le dioxygène initialement présent a donc été consommé. Dans l'expérience 3, le fer n'est pas rouillé et le niveau d'eau dans l'éprouvette n'a pas varié.

3. Le fer rouille quand il est en contact avec du dioxygène pur ou de l'air qui contient du dioxygène. Le diazote ne permet pas la formation de rouille. On en déduit que c'est le dioxygène de l'air et non le diazote qui est impliqué dans la transformation chimique à l'origine de la rouille. Sachant que l'atmosphère actuelle est principalement constituée de N<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, on peut aussi déduire ici que la proportion de O<sub>2</sub> dans l'air est de 1/5<sup>e</sup> ( $\approx 20\%$ ).

Ne pas conclure de l'expérience plus que ce qu'elle démontre réellement. Par exemple, cette expérience ne montre pas explicitement le rôle de l'eau.

## Exercices d'application

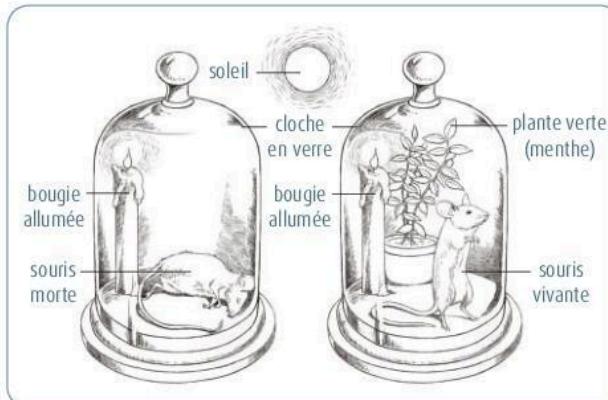
## Méthode

### 9 Tirer des conclusions d'une expérience

#### Le rôle des êtres vivants dans le cycle du dioxygène

En 1771, Joseph Priestley (1733-1804) place sous une cloche en verre éclairée par la lumière du Soleil, une bougie allumée et une souris. Il ajoute ou non un pied de menthe. Il observe la combustion de la bougie et le comportement de la souris.

**DOC 1** L'expérience de Priestley.



#### QUESTIONS

1. Expliquez les objectifs de l'expérience.
2. Décrivez les résultats observés.
3. Interprétez les expériences de Priestley.

#### AIDE

- Utilisez les équations bilans de la photosynthèse, de la combustion et de la respiration.

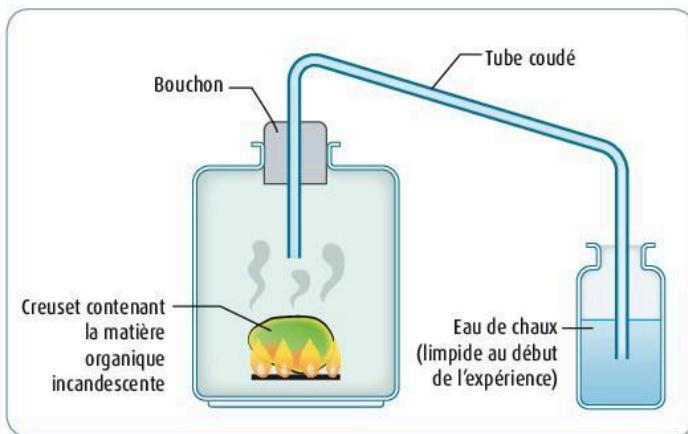
### 10 Tirer des conclusions d'une expérience

#### Deux étapes du cycle du carbone

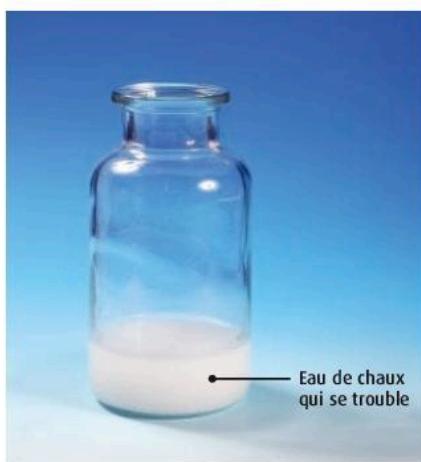
L'expérience schématisée ci-dessous a été réalisée dans un laboratoire. On précise que l'eau de chaux est une solution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  impliquée notamment dans la réaction suivante :



Le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , insoluble, est le composant principal du calcaire.



**DOC 1** L'expérience. Cette expérience ne doit pas être reproduite en raison des risques d'explosion.



**DOC 2** Les résultats de l'expérience.

#### QUESTIONS

1. Expliquez les objectifs de l'expérience.
2. Décrivez les résultats observés.
3. Interprétez-les.

## Tester ses compétences

### 11 Raisonner, rédiger

#### Les galets de pyrite du Witwatersrand (Afrique du Sud)

En Afrique du sud, dans la région du Witwatersrand, on trouve des roches datant de 2,9 milliards d'années contenant des galets de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) non altérés et parfaitement arrondis. Ces échantillons doivent être récoltés en profondeur, car la pyrite s'oxyde rapidement au contact du dioxygène atmosphérique. Au moment de sa formation, la pyrite est un minéral très anguleux. La forme arrondie des galets suggère qu'ils ont été transportés et érodés dans un flux d'eau s'écoulant rapidement. Aujourd'hui, ce type d'eaux «rapides» est très oxygéné.



**DOC1** Échantillon rocheux contenant des galets de pyrite.

**DOC 2** Cristaux de pyrite non érodés.

#### AIDE

- Plusieurs hypothèses sont envisageables. Utilisez vos connaissances sur l'atmosphère terrestre pour déterminer celle qui est la plus plausible.

#### QUESTION

Montrez que des galets de pyrite non altérés et arrondis ne pourraient pas se former sur la Terre actuelle puis proposez une ou des hypothèses pour expliquer leur formation il y a 2,9 milliards d'années.

### 12 Calculer, argumenter

#### Les ressources en charbon

Le charbon est un combustible fossile qui était à la base de 27 % de l'énergie consommée par l'humanité en 2017.

Région	Amérique du Nord	Amérique centrale et du Sud	Europe	Communauté des états indépendants (CEI)	Moyen-Orient et Afrique	Asie-Pacifique
Réserves	259	14	100	223	14	24

**DOC 1** Réserves mondiales de charbon prouvées fin 2017 (en milliards de tonnes).

Région	Amérique du Nord	Amérique centrale et du Sud	Europe	Communauté des états indépendants (CEI)	Moyen-Orient et Afrique	Asie-Pacifique
Consommation	0,51	0,05	0,43	0,23	0,14	3,95

**DOC 2** Consommation mondiale de charbon en 2017 (en milliards de tonnes).

#### QUESTION

À l'aide d'un calcul simple, justifiez le caractère non renouvelable du charbon.

### 13 Exploiter et mettre en relation des documents

#### Enquête au Crétacé

Le strontium (Sr) est un élément qui est apporté aux eaux océaniques par les sources hydrothermales et par l'altération des roches continentales.

Il existe deux isotopes du strontium:  $^{87}\text{Sr}$  et  $^{86}\text{Sr}$ .

Le strontium issu de l'altération des continents est plus riche en  $^{87}\text{Sr}$  que celui apporté par les sources hydrothermales.



**DOC 1** Évolution du rapport isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les roches océaniques au Crétacé.

#### QUESTIONS

- Décrivez l'évolution du rapport isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des roches océaniques au Crétacé.
- À l'aide des données de l'énoncé, justifiez l'affirmation suivante : « L'altération des roches continentales est associée à une augmentation du rapport isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les roches océaniques. »
- À l'aide de vos connaissances sur le cycle du carbone, proposez une explication à l'évolution de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone au Crétacé.

Teneur en  $\text{CO}_2$  (ppm: parties par million)



**DOC 2** Évolution de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone au Crétacé.

### 14 Calculer, raisonner

#### Le stockage du carbone dans deux écosystèmes

On cherche à étudier l'impact de deux écosystèmes sur le cycle du carbone : les forêts tropicales et les tourbières. Ces dernières sont des milieux humides dans lesquels la décomposition de la matière organique est extrêmement lente. On rappelle par ailleurs que la quantité totale de carbone présente dans le réservoir atmosphérique est de 750 GtC.

	Biomasse (GtC)	Matière organique « morte » et non décomposée (GtC)	Production primaire brute (GtC/an)
Forêt Tropicale	250	75	32
Tourbière	10	2000	2

**DOC 2** Quelques caractéristiques d'une forêt tropicale et d'une tourbière. Production primaire brute: biomasse produite par photosynthèse dans ces écosystèmes par année.



#### QUESTIONS

- Pour les deux écosystèmes, comparez à l'aide d'un calcul le carbone stocké dans les sols et dans la biomasse.
- Utilisez les données de l'énoncé et des photographies pour expliquer les résultats obtenus.
- Montrez que la combustion de vastes étendues de forêts tropicales a un impact fort sur le cycle du carbone.

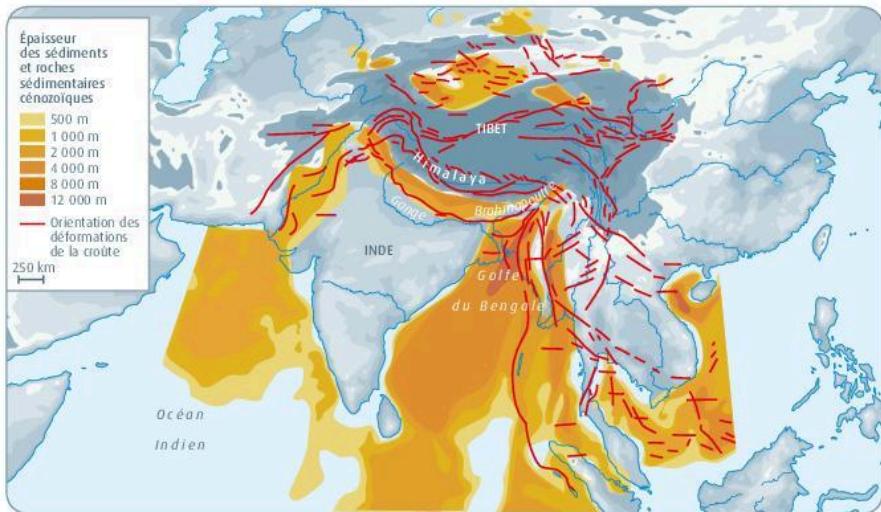
**DOC 1** Forêt tropicale (haut) et tourbière (bas).

- Expliquez pourquoi, malgré leur faible production primaire, les tourbières sont des écosystèmes essentiels dans le cycle du carbone.

## 15 Exploiter des documents, effectuer des calculs

## L'Himalaya et le cycle du carbone

Les roches constituant les chaînes de montagnes sont majoritairement constituées de minéraux appelés silicates. Ces roches sont progressivement érodées notamment par l'eau et leurs minéraux subissent des réactions (altération) au contact de l'eau et de l'atmosphère. Les minéraux ayant réagi ou non terminent leur course dans l'océan, entraînés par les cours d'eau.

**DOC 1** Carte des bassins sédimentaires associés à la chaîne de l'Himalaya.

On estime qu'environ 200 000 kilomètres cubes ( $2 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$ ) de roches (masse volumique de  $3 \text{ t/m}^3$ ) de la chaîne himalayenne ont été altérés depuis sa formation il y a environ 10 millions d'années. Le calcium libéré représente environ 1,4 % de la masse totale de roches.

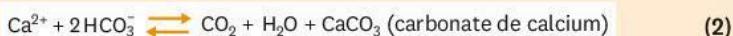
**Définitions utiles**

- Silicate:** minéral riche en silice (Si). L'anorthite et la kaolinite sont des silicates.
- Bassin sédimentaire:** lieu de dépôts des sédiments. Ici, les sédiments sont les produits de l'érosion de roches silicatées.

L'anorthite réagit spontanément avec l'eau et le dioxyde de carbone atmosphérique :



La kaolinite a tendance à se déposer dans le fond de l'eau lorsqu'il y a peu d'agitation tandis que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  restent en solution dans l'eau. Lorsque l'eau des fleuves arrive en mer, la réaction suivante se produit :



Le carbonate de calcium, principal composant du calcaire, se dépose au fond des océans.

**DOC 2** Une réaction d'altération d'un silicate fréquent dans les roches de montagnes : l'anorthite.**QUESTIONS**

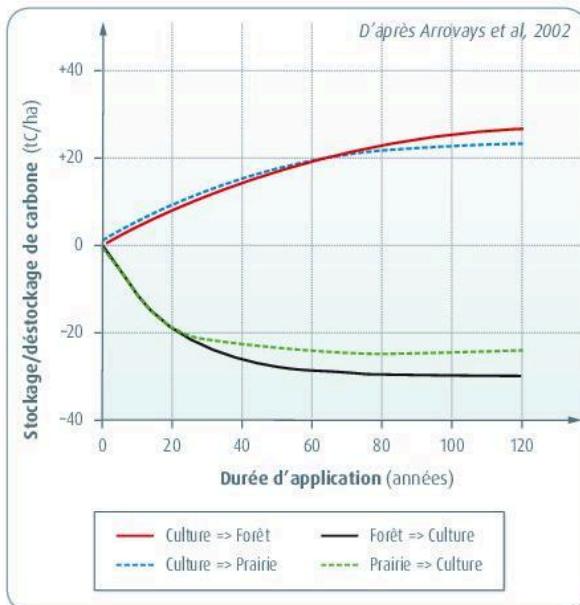
- Écrivez le bilan de la réaction (1) + (2)
- Expliquez quel est l'impact de ces réactions sur le cycle du carbone atmosphérique.
- Discutez de la relation entre l'épaisseur des sédiments et la distance à la chaîne de l'Himalaya.
- Sachant que 1 kg de calcium permet la fixation de 1,1 kg de  $\text{CO}_2$ , calculez la quantité de dioxyde de carbone fixée depuis la formation de l'Himalaya.
- Comparez la valeur obtenue avec celle du réservoir atmosphérique actuel de dioxyde de carbone, soit de  $2750 \times 10^9$  tonnes de  $\text{CO}_2$ .
- Justifiez l'expression suivante utilisée par les scientifiques : «L'Himalaya est une pompe à  $\text{CO}_2$ .»

## 16 Calculer, argumenter

### Stocker du carbone dans les sols

Le premier mètre des sols mondiaux forme un réservoir d'environ 1600 GtC de carbone sous forme de matière organique et 800 GtC sont contenues dans les 30 premiers centimètres. Le stockage du carbone peut être modifié par le changement d'affectation d'un sol, c'est-à-dire par une modification de son usage: culture agricole, prairies

(végétation herbacée permanente, souvent utilisée comme pâturages), support de forêts (végétation arborescente permanentes)... Le **DOC. 1** montre le résultat de modélisations de ce phénomène. Le stockage de carbone d'une culture agricole dépend lui-même de la façon dont est gérée la culture, comme le montre le **DOC. 2**.



**DOC 1** Évolution du stockage de carbone lors d'un changement d'affectation d'un sol.  
1ha = 1 hectare = 10000 m<sup>2</sup>.

#### Quelques données

- Émissions de carbone liées à l'agriculture en France : 25 MtC/an.
- Émissions atmosphériques de CO<sub>2</sub> s'accumulant dans l'atmosphère à l'échelle de la planète: 4,3GtC/an.

Systèmes de culture	Principe	Stockage supplémentaire de carbone
Couverts végétaux permanents	Sol toujours couvert de végétaux vivants ou morts	0,3 t/ha/an
Agroforesterie	Arbres placés dans les cultures ou à proximité	0,4 t/ha/an



**DOC 2** Bilan carbone de deux systèmes de culture.

#### QUESTIONS

- Calculez la proportion de carbone stockée dans les 30 premiers cm de sol par rapport au réservoir formé par le premier mètre des sols mondiaux.
- Comment devrait augmenter cette proportion si on veut stocker l'excédent de CO<sub>2</sub> qui s'accumule dans l'atmosphère en un an dans les 30 premiers cm de sol?
- Décrivez l'effet du changement d'affectation des sols sur le stockage du carbone (**DOC. 1**).
- La surface agricole française est de 28 millions d'hectares. Calculez la quantité de carbone qui pourrait être stockée chaque année dans l'hypothèse où l'ensemble de cette surface se convertirait à l'agroforesterie (**DOC. 2**).
- Discutez du résultat obtenu.

#### AIDE

- Pour la question 2., exprimez le résultat en kg/ha ou en t/ha.
  - GtC: milliard de tonnes de carbone ; MtC: million de tonnes de carbone.