

II. L'évolution conjointe de l'atmosphère et de la vie

A. L'apparition du dioxygène atmosphérique

Problème posé : quelle est l'origine du dioxygène et pourquoi est-il apparu tardivement dans l'air ?

→ Activité 2 : répondez aux questions p 23

1. Indiquez l'origine du dioxygène sur la planète Terre

DOC

1

Les cyanobactéries, premiers organismes producteurs de dioxygène

Les stromatolithes* sont de très anciennes structures résultant d'une activité biologique. Ils sont contenus dans des affleurements rocheux de Pilbara (Australie) qui datent de – 3,5 Ga (a). L'étude de leur formation se fait par comparaison avec des stromatolithes s'édifiant actuellement en milieu marin (b).



a Stromatolithes fossiles de Pilbara (Australie).



b Stromatolithes actuels de Shark Bay (Australie).

Les stromatolithes se forment grâce à l'activité photosynthétique des cyanobactéries* qu'elles contiennent (c). En effet, les cyanobactéries effectuent des échanges gazeux avec leur environnement : elles absorbent le dioxyde de carbone (CO₂) dissous dans l'eau des océans et dégagent du dioxygène (O₂).

Deux modes de croissance des stromatolithes existent. Le premier est le piégeage mécanique de particules minérales par les tapis des colonies bactériennes, piégeage suivi du dépôt de nouveaux grains, eux-mêmes encroûtés à leur tour par les cyanobactéries (d).

Le second est la précipitation biochimique de minéraux associée à l'activité photosynthétique. Dans cette situation, deux réactions chimiques ont lieu :

– la photosynthèse

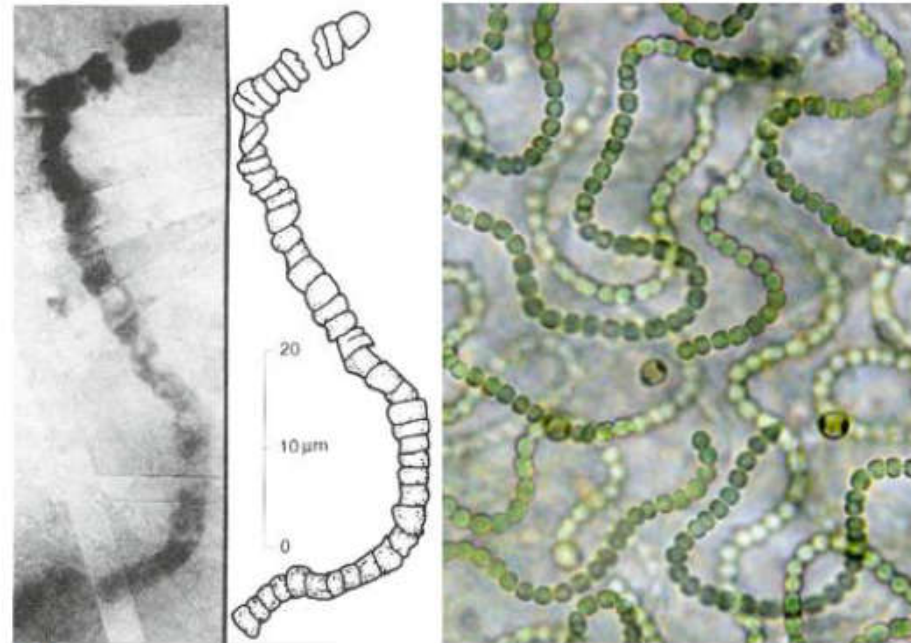


– la précipitation* des ions carbonates sous forme de calcaire



La photosynthèse, en consommant du CO₂, favorise localement la précipitation des carbonates.

(d) Coupe de la partie superficielle d'un stromatolithe actuel. Les couches vertes de cyanobactéries vivantes alternent avec des couches claires de matière minérale. ➤



(c) Cyanobactéries fossiles de Pilbara (à gauche) et actuelles du genre *Nostoc* (à droite) vues au microscope optique.



Le dioxygène terrestre a pour origine la vie.
En effet, le dioxygène a été libéré par des cyanobactéries qui pratiquaient la photosynthèse.

L'équation de ce métabolisme est la suivante :



2. Interprétez les résultats obtenus lors de l'expérience réalisée avec des cyanobactéries actuelles.

Doc

2

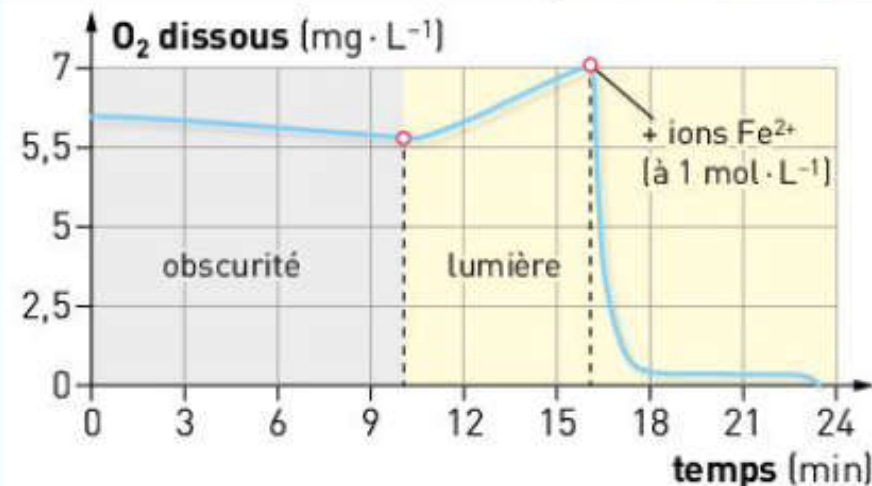
Le devenir du dioxygène libéré par les cyanobactéries

Les premières traces de présence de dioxygène libre dans l'atmosphère remontent à - 2,4 Ga alors que les plus vieux stromatolithes datent d'au moins - 3,5 Ga. Plusieurs expériences simples (a et b) permettent de comprendre ce décalage temporel entre la production de dioxygène et son accumulation dans l'atmosphère.

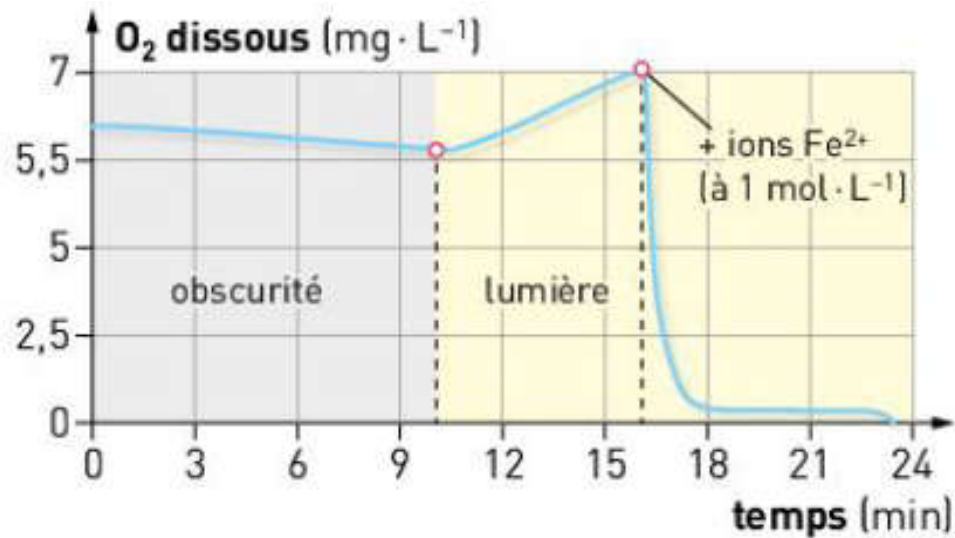


Démarche expérimentale

- Introduire des cyanobactéries dans l'enceinte de mesure d'un dispositif ExAO, équipé d'une sonde oxy-métrique.
- Lancer les mesures dans l'obscurité puis les poursuivre avec un apport de lumière.
- Quelques minutes plus tard, injecter 2 à 3 mL d'une solution contenant des ions Fe^{2+} à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (les ions Fe^{2+} étaient présents dans les océans où vivaient les cyanobactéries fossiles).



a Résultats des mesures et aperçu du contenu de l'enceinte de mesure en fin d'expérience.



En absence de lumière, la quantité de dioxygène diminue dans l'enceinte de réaction : les bactéries consomment du dioxygène, cette consommation est liée à la respiration.

Puis, à la lumière, la quantité de dioxygène augmente dans l'enceinte.

Cette augmentation provient de la production de ce gaz par les bactéries *via* la photosynthèse puis à sa libération.

Enfin, une injection unique d'une solution d'ions ferreux Fe^{2+} provoque la chute voire la disparition totale du dioxygène dans l'enceinte.




La photographie montre l'existence d'un dépôt de couleur rouille dans l'enceinte.

Ce précipité correspond à de l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ce qui explique la chute observée du taux de dioxygène ayant servi à l'oxydation du fer.


3. Sachant que l'hématite est une forme déshydratée de l'hydroxyde ferrique, écrivez et équilibrez les équations des réactions chimiques aboutissant à sa formation à partir des ions Fe^{2+}

une pointe de spatule de sulfate de fer (FeSO_4) dans de l'eau du robinet



solution incolore d'ions Fe^{2+}


apport de dioxygène par bullage




les ions Fe^{2+} cèdent spontanément leurs électrons au dioxygène selon les équations suivantes :

$$4 \text{Fe}^{2+} \longrightarrow 4 \text{Fe}^{3+} + 4e^-$$
$$\text{O}_2 + 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4e^- \longrightarrow 6 \text{H}_2\text{O}$$

solution brune d'ions Fe^{3+}



ajout d'hydroxyde de sodium ($10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), source d'ions OH^-



formation d'un précipité de rouille d'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$

b Précipitation chimique du fer.

Les fers rubanés (**c**) sont des roches sédimentaires qui se sont formées en milieu marin par précipitation de substances dissoutes, notamment d'oxydes de fer, entre - 2,5 et - 1,9 Ga. Elles contiennent des couches siliceuses, qui sont alternativement de couleur rouge car riches en hématite (Fe_2O_3), et de couleur plus sombre car pauvres en ce même minéral.



une pointe de spatule
de sulfate de fer (FeSO_4)
dans de l'eau du robinet



solution incolore
d'ions Fe^{2+}

apport de dioxygène
par bullage



les ions Fe^{2+} cèdent spontanément leurs électrons
au dioxygène selon les équations suivantes :

$$4 \text{Fe}^{2+} \longrightarrow 4 \text{Fe}^{3+} + 4e^-$$

$$\text{O}_2 + 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4e^- \longrightarrow 6 \text{H}_2\text{O}$$

solution brune
d'ions Fe^{3+}



ajout d'hydroxyde
de sodium
($10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$),
source d'ions OH^-



formation d'un précipité
de rouille d'hydroxyde
ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$

Les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène sont les suivantes :



L'hématite Fe_2O_3 est une forme déshydratée de l'oxyde ferrique, ce qui signifie qu'il y a eu perte d'eau soit la réaction :



Les fers rubanés (📷) sont des roches sédimentaires qui se sont formées en milieu marin par précipitation de substances dissoutes, notamment d'oxydes de fer, entre – 2,5 et – 1,9 Ga. Elles contiennent des couches siliceuses, qui sont alternativement de couleur rouge car riches en hématite (Fe_2O_3), et de couleur plus sombre car pauvres en ce même minéral.



Entre – 3,5 Ga et – 2,4 Ga, le dioxygène est libéré dans les eaux océaniques par la photosynthèse des cyanobactéries. Ces eaux sont riches en ions Fe^{2+} qui réagissent avec le dioxygène. Des roches, les fers rubanés, se forment emprisonnant l'oxygène sous forme d'oxydes de fer et l'empêchant ainsi de passer dans l'atmosphère. Une fois les ions Fe^{2+} en grande partie épuisés dans l'océan, le dioxygène est libéré dans l'atmosphère. Les fers rubanés ne se forment plus du tout après – 1,9 Ga, ce qui correspond à une oxydation massive de l'atmosphère.

L'hydrosphère s'est formée, dans laquelle s'est développée la vie.

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.

→ Bilan 2a et 2b p 30