

matière organique avec un sous-produit: l'O<sub>2</sub>. Consommation du CO<sub>2</sub> et production d'O<sub>2</sub> ont modifié notre atmosphère, en même temps que se développait la biomasse.

Mais il y a un hic. Très oxydant, l'oxygène est toxique pour les êtres vivants qui n'y sont pas adaptés: sa libération et son accumulation dans l'atmosphère entre 2,3 et 1,8 milliards d'années, un événement connu sous le nom de Grande Oxydation, semblent avoir été suivies d'un milliard d'années pauvres en fossiles. Dans cette biosphère perturbée, l'intensité de la photosynthèse elle-même chuta d'au moins 80%. La biosphère a néanmoins survécu à l'oxygène. Les cyanobactéries sont toujours présentes aujourd'hui, et certaines vivent dans les cellules des plantes ou des algues où, après «domestication», elles sont devenues... les chloroplastes, ces compartiments qui effectuent justement la photosynthèse. Un processus bactérien est devenu celui du monde végétal.

Certains microbes parvinrent à tolérer l'oxygène, d'autres à l'utiliser. Ce fut le début de la respiration aérobie, une sorte de miroir de la photosynthèse où l'oxygène est utilisé pour oxyder de la matière organique: cela libère de l'énergie et du CO<sub>2</sub>. On parle ici de la «respiration cellulaire», un ensemble de processus métaboliques récupérant l'énergie de molécules organiques grâce à une réaction avec l'oxygène. La respiration aérobie est un métabolisme de bactéries dont certaines, à l'instar des cyanobactéries devenues chloroplastes, ont été accaparées par un lointain ancêtre commun aux animaux,

### — En bref —

> La Terre, inhabitable pour nous au moment de sa formation, a été transformée par l'activité microbienne qui l'a rendue propice à la diversification des formes de vie actuelles.

> Des bactéries ont produit l'oxygène et capté le CO<sub>2</sub>, faisant de notre atmosphère celle que nous connaissons.

> Ces microbes, invisibles, constituent une part majeure de la biomasse et convertissent dans de grands cycles le carbone, le fer, l'azote, le soufre...

> Ce faisant, ils influent notablement sur le climat, les océans, le sous-sol et participent aux extinctions de masse.

plantes, champignons et amibes pour évoluer en mitochondries, ces compartiments de la cellule producteurs d'énergie grâce à la respiration aérobie. Quand nous apportons de l'oxygène à nos cellules, nous alimentons des microbes invisibles!

L'O<sub>2</sub> libéré par les cyanobactéries a eu un autre effet crucial: dans la stratosphère, entre 13 et 40 kilomètres d'altitude, les rayonnements solaires le transforment en ozone (O<sub>3</sub>). Or là-haut, ce gaz intercepte plus de 97% des rayonnements ultraviolets B particulièrement nocifs pour l'ADN. Avant l'établissement de la couche d'ozone, l'essentiel de la vie était réfugié sous les eaux ou dans les roches... L'oxygénation de l'atmosphère et l'installation d'un bouclier d'ozone protecteur rendirent les continents habitables pour une large gamme d'organismes!

### OXYGÈNE EN EXCÈS OU MANQUANT ?

Le lien entre la quantité de biomasse formée par la photosynthèse et la quantité d'oxygène est évident. Pourtant, en considérant toute la biomasse terrestre, le résultat du calcul de la quantité d'oxygène que devrait contenir l'atmosphère est cent fois inférieur à ce qu'il est en réalité. C'est que nous avons oublié la matière organique d'origine biologique fossilisée, enfouie dans le sous-sol, accumulée dans les charbons ou dispersée dans d'autres sédiments, argiles et marnes par exemple. Refaisons le calcul... encore raté, car on obtient cette fois cent fois plus d'oxygène qu'attendu. Où est l'erreur?

En fait, l'oxygène libéré par des millions d'années de photosynthèse et d'enfouissement de la matière organique a réagi avec d'autres éléments, spontanément ou avec l'aide de bactéries dites «chimiolithotrophes» qui tirent leur énergie vitale de telles réactions chimiques. Le soufre, initialement présent sous forme de sulfures et de soufre natif, a été oxydé en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et autres formes oxydées du soufre; l'azote, au départ, surtout du diazote gazeux  $\text{N}_2$ , en nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )... Aujourd'hui communs, ces ions dissimulant l'oxygène invisible sont des produits largement bactériens issus de la Grande Oxydation.

Des métaux contenus dans les roches proches de la surface de la Terre ancienne ont eux aussi été oxydés: l'uranium, le nickel et d'autres encore, mais surtout le fer (le plus abondant, qui représente 8% de la croûte terrestre). Majoritairement ferreux (sous forme d'ion  $\text{Fe}^{2+}$ ) à l'origine, il a été oxydé en fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), celui de la rouille, qui résulte elle-même en partie de l'action de bactéries chimiolithotrophes vivant de l'oxydation du fer. Cependant, à l'inverse du fer ferreux, le fer ferrique est insoluble dans l'eau aux conditions d'acidité habituelles et précipite sous forme solide. En conséquence, la Grande Oxydation a laissé une trace des plus spectaculaires: les fers rubanés (voir la figure ci-dessous), des roches contenant de 15 à 30% de fer et représentant 90% du minerai de fer exploité. Leurs dépôts s'échelonnent entre 3,8 et 2 milliards d'années: ils précèdent donc la Grande Oxydation, sans

doute parce que l'oxygène des cyanobactéries a été utilisé dès le début de sa production.

Une hypothèse alternative propose que les bactéries des fers rubanés aient réalisé... une photosynthèse basée sur le fer. De telles bactéries existent aujourd'hui, même si elles sont peu connues. Dans la photosynthèse des cyanobactéries, l'énergie de la lumière sert à arracher des électrons à une molécule d'eau (qui donne l' $\text{O}_2$ ) qui contribuent à transformer le  $\text{CO}_2$  en matière organique. Dans la photosynthèse basée sur le fer, la lumière arrache des électrons au fer ferreux, qui devient ferrique et précipite.

## DES OCÉANS ANÉMIÉS

Le fer oxydé est donc moins soluble. Si le fer manque rarement dans les sols, où il provient des roches sous-jacentes, il est rare dans les océans actuels, notamment en surface. C'est la raison pour laquelle les zones littorales sont plus poissonneuses que le cœur des océans: les fleuves y déversent du phosphate et du nitrate, mais surtout du fer venu des sols, indispensable à la photosynthèse du plancton, lui-même vital aux chaînes alimentaires conduisant aux poissons... Voilà pourquoi les pêcheurs français demandent l'accès aux eaux britanniques! En effet, rien ne sert d'aller au milieu des océans, très pauvre en plancton, car le fer manque. Un bel exemple d'actualité dont les ressorts, *in fine*, sont à chercher dans le monde des invisibles.

Les besognes bactériennes modulent également la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$ . De fait, la

85



## Témoins de la Grande Oxydation

Les fers rubanés (ici, un échantillon collecté près de Barberton, en Afrique du Sud) dans lesquels alternent les couches grises à brun-rouge d'hématite (un oxyde ferrique,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , où le fer est sous sa forme la plus oxydée  $\text{Fe}^{3+}$  et celles, roses, de silice plus ou moins ferrugineuse, témoignent de la Grande Oxydation, la période d'enrichissement de l'atmosphère en oxygène produit par des bactéries.

photosynthèse et la fossilisation de la biomasse enfouie dans les sédiments appauvrissent l'atmosphère en  $\text{CO}_2$ ... Ici encore, les bactéries, mais aussi les algues planctoniques, jouent un rôle important, au travers de deux mécanismes.

Le premier, la pompe biologique, fait intervenir les seuls organismes marins. Des plus gros organismes flottants jusqu'aux microbes (bactéries, algues et autres unicellulaires, qui constituent 90 % de la biomasse aquatique), leur maintien en surface, là où est la lumière, est un processus actif. Il implique des mouvements, comme la nage, l'entretien d'expansions qui freinent la chute, et la production de composants qui diminuent la densité, notamment des lipides peu denses ou des vésicules intracellulaires contenant du gaz chez les cyanobactéries et les archées. À leur mort, les organismes coulent donc et s'amoncellent au fond des océans. Cette biomasse intègre les sédiments en formation où, en l'absence d'oxygène, elle se fossilise.

## D'UNE POMPE À L'AUTRE

Le deuxième processus, la pompe des carbonates, fait d'abord intervenir des microbes qui, dans les sols ou les roches émergées, aident à l'attaque des minéraux par l'eau. Les bactéries, mais aussi des champignons microscopiques, agissent sur la dissolution des roches, par exemple au sein des minces couches microbiennes (ou biofilms) qui recouvrent et teintent de gris falaises et façades, mais aussi dans les sols ou plus en profondeur. Ces microbes agissent en produisant de l'acidité et piègent une partie des produits solubilisés de la roche, car c'est ainsi qu'ils libèrent le fer, le phosphore ou le potassium nécessaires à leur alimentation ! Les microbes aident également à libérer du calcium et du magnésium, et augmentent ainsi leur transfert vers les océans par les eaux douces. Là, microbes et animaux à coquilles les combinent au  $\text{CO}_2$  atmosphérique dissout dans l'eau, pour former des enveloppes calcaires protectrices (voir la figure page 82).

À leur mort, les cellules, alourdies par ce lest, sombrent. Par exemple, les restes des algues unicellulaires du groupe des coccolithophoridés constituent la craie des falaises de Normandie, tandis que les miliolles (des amibes unicellulaires) ont donné les calcaires qui construisent Notre-Dame ou le château de



Versailles (voir les photos ci-dessus). Ces chefs-d'œuvre de l'architecture classique française doivent beaucoup à la pompe des carbonates, actionnée depuis des millions d'années par de minuscules organismes.

Pompe biologique et pompe des carbonates soutirent donc du  $\text{CO}_2$  à l'atmosphère... Le carbone des carbonates représente environ 80 % du carbone piégé dans la croûte terrestre contre 20 % pour les roches carbonées (pétroles et charbons). À la faveur de mouvements tectoniques, les roches calcaires et riches en matière organique formées au fond des océans reviennent parfois en surface où elles sont altérées ; d'autres sont déstabilisées par la chaleur et la pression lors de leur enfouissement, dans les zones de subduction notamment. Ces événements libèrent alors du  $\text{CO}_2$ , mais finalement après un long séjour dans le sous-sol, loin de l'atmosphère.

La réduction de la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$  a une conséquence climatique : elle diminue l'effet de serre global, largement lié à ce gaz au fort pouvoir réchauffant. Cependant, quant au climat, les microbes soufflent aussi bien le chaud que le froid, car on leur doit aussi une grande partie des gaz entretenant l'effet de serre. Ils libèrent bien un peu de  $\text{CO}_2$  lors de l'attaque des calcaires et par leur respiration, mais ils sont surtout à l'origine de deux autres