



← Les pierres du château de Versailles (à gauche), en calcaire, résultent de l'accumulation des enveloppes carbonatées des miliolites (à droite), de minuscules organismes marins, au fond des océans.

gaz aux contributions climatiques majeures : le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4). Ces deux gaz proviennent de milieux dépourvus d'oxygène, comme le tube digestif des animaux, les sédiments, les eaux stagnantes ou les roches. Certaines bactéries y respirent en remplaçant l' O_2 par le nitrate par exemple, ce qui engendre souvent du N_2O , tandis que des archées, parfois aidées de bactéries, respirent en utilisant le CO_2 et émettent du CH_4 : plus de 90 % du méthane sur Terre ont une origine microbienne, ce qui explique pourquoi on le cherche activement sur Mars !

COUPS DE CHAUD

Par la production de CO_2 , N_2O et CH_4 , le monde microbien contribue à un effet de serre minimal. Rappelons que, sans celui-ci, la température moyenne terrestre chuterait à -18°C , voire moins, car la formation de glace, réfléchissant la lumière solaire, diminuerait encore plus la température. Aujourd'hui, une partie de l'effet de serre d'origine anthropique provient de bactéries vivant dans des milieux dépourvus d'oxygène : sols irrigués des cultures et sols inondés des rizières, tube digestif du cheptel bovin en expansion... Les microbes encouragés par nos activités

agricoles produisent la moitié du méthane et les deux tiers du N_2O dus à l'humanité.

Le rôle climatique des microbes est violemment illustré par des épisodes de réchauffement climatique passés, qui furent accompagnés d'un brutal déficit en O_2 dans les océans : les « événements anoxiques océaniques » ou EAO. Très tôt repérés par les paléontologues, car les variations climatiques associées causèrent l'extinction de nombreuses espèces, ils sont aussi connus des géologues pétroliers puisque ces périodes ont coïncidé avec des dépôts de roches riches en matière organique à même de se transformer en hydrocarbures. Par exemple, à la fin du Paléocène, il y a 56 millions d'années, la température océanique augmenta de 5 à 8°C et celle de l'atmosphère de 10°C , en 20 000 ans seulement. Durant près de 100 000 ans, les circulations atmosphériques et marines furent profondément modifiées et le fond de l'océan devint très anoxique : cela entraîna une extinction des foraminifères marins et un renouvellement des espèces de mammifères continentaux, mettant en place les groupes actuellement dominants. Encore quelque chose qui a bâti le monde moderne...

D'autres EAO sont plus anciens, comme celui du Toarcien, il y a 183 millions d'années, qui dura 600 000 ans. Il se traduisit par une

Les microbes produisent la moitié du méthane et les deux tiers du N_2O dus à l'humanité

extinction massive des espèces du fond des océans, et dans une moindre mesure de celles de leur surface.

Ces événements sont associés à une particularité : le carbone des calcaires qui se déposent alors est très appauvri en un isotope, le carbone 13 (^{13}C), ce qui met sur la piste d'un possible rôle du méthane. En effet, le CH_4 d'origine microbienne est très pauvre en ^{13}C : un relargage soudain de CH_4 , suivi de son oxydation en CO_2 dans l'atmosphère ou dans les océans, conduit à des dépôts calcaires anormalement appauvris en ^{13}C . L'oxydation du CH_4 dans les océans contribua à réduire la quantité d' O_2 , expliquant l'anoxie des océans et la préservation consécutive de la matière organique à l'origine du pétrole. Cependant, une fraction du CH_4 s'échappa et réchauffa l'atmosphère. D'où venait-il ?

Le CH_4 est en permanence produit de manière chimique et, à 90 %, biologique dans les roches profondes et les sédiments, dépourvus d'oxygène. Gaz peu dense, il fait son chemin vers le plancher océanique où la pression de la colonne d'eau et des sédiments ainsi que la basse température (4°C) de l'eau provoquent la formation de clathrates, des édifices moléculaires où le CH_4 est piégé dans de la glace d'eau. Actuellement, de gigantesques réserves de clathrates sont prisonnières dans les sédiments. Mais si la pression baisse, suite par exemple à une baisse du niveau marin, ou si la température augmente, consécutivement par exemple à une modification de la circulation des eaux profondes de l'océan après un début de réchauffement, les clathrates se déstabilisent et libèrent le CH_4 . De tels relargages ont contribué sinon à déclencher, du moins à amplifier les EAO. Et aujourd'hui, à l'heure où l'effet de serre anthropique réchauffe les

océans, la bombe à retardement des clathrates inquiète beaucoup...

Durant les EAO, les extinctions liées au changement climatique et à l'anoxie des fonds océaniques sont parfois renforcées par un autre effet également lié... à des bactéries. Les fonds océaniques anoxiques sont en effet pleins de matière organique et de méthane, non utilisés par des organismes respirant avec de l'oxygène, car celui-ci y est en quantité insuffisante. Par contre, des bactéries, dites « sulfatoréductrices », respirent en remplaçant l'oxygène par les sulfates qui sont alors transformés en H_2S , un gaz à l'odeur d'œuf pourri et surtout très toxique. C'est ce qui se passe lorsque les algues des marées vertes s'accumulent sur nos côtes. À plus grande échelle, cela a probablement contribué aux extinctions d'espèces.

UNE BIOSPHÈRE PLUS PROFONDE QUE PRÉVU

Archées et bactéries règnent aussi dans les entrailles de la Terre, comme le suggère le CH_4 profond d'origine biologique. En fait, les roches sont loin d'être biologiquement inertes, comme en attestent les forages ou les expériences tentant d'injecter du CO_2 dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre pour contrer l'augmentation des teneurs atmosphériques. Les basaltes sont appropriés dans cette perspective, car le CO_2 y est piégé en formant des carbonates solides avec le fer et le calcium présents. Mais des colmatages inattendus des pores censés accueillir ce gaz sont fréquents, comme récemment sur le site islandais d'Helisheidi où des injections expérimentales ont eu lieu entre 500 à 800 mètres de profondeur. Les communautés bactériennes réagissent à la présence de CO_2 et d' H_2S dans les fluides