

L'étude géologique corrobore cette hypothèse. La profusion de roches riches en matière organique – du schiste noir – datant du Paléozoïque indique que les concentrations d'oxygène dans les océans devaient être faibles à cette époque; en effet, l'exposition à des concentrations d'oxygène plus élevées aurait causé la décomposition de la matière organique. Dans ces conditions, le fer et les autres micronutriments grâce auxquels les algues vertes se sont épanouies se seraient dissous plus facilement dans l'océan et auraient été facilement disponibles pour la photosynthèse.

Les schistes noirs du Mésozoïque sont en revanche plus rares. Cela implique que, dans l'ensemble, les concentrations d'oxygène étaient alors bien plus élevées. Ces conditions auraient aidé les micronutriments utilisés par le phytoplancton de lignée rouge à demeurer dissous dans les océans et consommable.

La part de l'érosion

Mais les changements de concentration des micronutriments durant le Mésozoïque n'expliquent pas à eux seuls le développement important du phytoplancton, et en particulier des algues rouges. Nous avons envisagé que les changements de disponibilité en macronutriments (éléments nutritifs disponibles en plus fortes concentrations), tels que le phosphore, ont aussi contribué au succès de ces groupes. Et ces macronutriments, utilisés par le phytoplancton dans des processus biochimiques fondamentaux tels que la synthèse de l'ADN, semblent avoir gagné les océans à partir d'événements qui ont eu lieu sur la terre ferme.

Vers la fin du Paléozoïque et au Mésozoïque, les forêts se sont étendues sur les continents et le climat a commencé à se faire plus humide, augmentant les phénomènes d'érosion sur les continents. L'altération physique et chimique résultant du processus de fragilisation des sols par les racines, de la décomposition des feuilles mortes et de la formation d'humus a augmenté. Cela aurait favorisé le ruissellement d'éléments nutritifs du sol et de détritiques végétaux dans les bras de mer peu profonds où le plancton prospérait. L'émergence des plantes à fleurs, au cours du Mésozoïque, aurait renforcé le ruissellement de nutriments, parce que leurs feuilles mortes se

décomposent plus rapidement que celles des conifères, cycas et autres arbres qui formaient les premières forêts.

Des preuves de l'érosion continentale proviennent d'analyses du rapport des concentrations des différents isotopes de l'élément strontium contenus dans les coquillages fossiles (voir l'encadré page 51). Les roches continentales sont plus riches en strontium 87 que les roches océaniques. Comme on observe dans les coquillages fossiles une augmentation du rapport strontium 87/strontium 86 au cours du temps, il semble que les éléments nutritifs étaient transportés des terres vers les océans en quantités de plus en plus grandes, comme on s'y attendrait en cas d'érosion continentale. Des études isotopiques similaires conduites sur un autre élément, le lithium, confirment la tendance.

Les études isotopiques confirment non seulement l'existence de tels flux

en provenance des terres, mais ont aussi appuyé l'idée – proposée pour la première fois par l'un de nous (R. Martin) en 1996 – que le ruissellement d'éléments nutritifs issus de l'altération continentale pourrait augmenter la biodiversité du phytoplancton et des animaux qui s'en nourrissent. Si la contribution de nutriments en provenance des terres jouait un rôle dans la diversification du plancton et des créatures pendant le Mésozoïque et le Cénozoïque, on pourrait s'attendre à ce que l'augmentation du rapport strontium 87/strontium 86 dans les coquilles soit parallèle à l'augmentation de la diversité d'espèces marines. Cela a été confirmé en 2010 par les travaux de John Alroy, de l'Université de Macquarie en Australie. Une autre étude, publiée la même année par Andrés Cárdenas et Peter Harries, de l'Université de Floride du Sud, montre une corrélation similaire.



2. UNE EFFLORESCENCE ALGALE se propage dans l'Atlantique en mai 2010. Ce phénomène est fréquent au printemps; il est donc difficile de savoir si les retombées de cendres riches en nutriments du volcan islandais Eyjafjallajökull ont eu un rôle dans la prolifération du phytoplancton. Cependant, en 2008, l'éruption du volcan Kasotochi, dans le Pacifique, a provoqué une efflorescence en apportant du fer au phytoplancton dans une mer pauvre en cet élément.

■ LES AUTEURS

Ronald MARTIN est professeur de géologie à l'Université du Delaware, aux États-Unis.

Antonietta QUIGG est professeur de biologie marine à l'Université A&M du Texas, à Galveston.

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Martin et A. Quigg, *Evolving phytoplankton stoichiometry fueled diversification of the marine biosphere*, *Geosciences*, vol. 2(2), pp. 130-146, 2012.

B. Langmann *et al.*, *Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, pp. 3891-3899, 2010.

T. Servais *et al.*, *Understanding the great Ordovician biodiversity event : influence of paleogeography, paleoclimate, or paleoecology ?*, *GSA Today*, vol. 19, n° 4/5, 2009.

T. Servais *et al.*, *The Ordovician biodiversification : revolution in the oceanic trophic chain*, *Lethaia*, vol. 41, pp. 99-109, 2008.

Des niveaux d'oxygène plus élevés dans les océans et le développement des forêts et des plantes à fleurs n'auraient pas été les seuls facteurs renforçant la disponibilité d'éléments nutritifs pour le phytoplancton. La formation de montagnes lors des collisions de plaques continentales (qui ont conduit à la formation du supercontinent Pangée) expose plus de roches à l'érosion. Ce phénomène, ajouté à la baisse du niveau des océans, se serait traduit, avant le Mésozoïque, par une hausse de l'érosion des terres et le ruissellement de nutriments vers les mers. Le cycle de l'eau a aussi été influencé par la présence des glaciers continentaux qui occupaient l'hémisphère Sud durant la plus grande partie du Paléozoïque tardif. Les glaciers ont refroidi l'eau qui, devenant plus dense, s'enfonçait au fond. Cela a entraîné une circulation rapide de l'eau et l'oxygénation des océans. Cet effet d'oxygénation a aussi eu lieu dans les remontées d'eaux profondes riches en phosphore provenant de la décomposition de matière organique.

L'ensemble de ces facteurs aurait créé les conditions favorables permettant au phytoplancton de lignée rouge de prospérer, lui fournissant les micronutriments et les macronutriments dont il avait besoin pour se développer.

Le règne des algues vertes pauvres en nutriments durant la première moitié du Paléozoïque semble avoir limité l'évolution des animaux marins, retardant l'apparition de nouvelles formes de vie au métabolisme plus élevé. Mais lorsque le phytoplancton riche en nutriments a pris une place centrale, les animaux marins qui s'en nourrissaient ont connu une diversification rapide, comme le montre l'étude des fossiles. De nouveaux groupes de poissons prédateurs sont entrés en scène, avec, entre autres, de nouvelles variétés de mollusques, crustacés, coraux et bivalves.

Deux expériences de terrain récentes offrent une preuve de principe que l'apport d'éléments nutritifs que nous avons décrit pourrait avoir suscité la diversification d'animaux multicellulaires. Dans la première, Tron Frede Thingstad, de l'Université de Bergen, en Norvège, et ses collègues ont ajouté du phosphore à des eaux de surface de la Méditerranée orientale, qui sont naturellement très pauvres en nutriments, et particulièrement en phosphore. Ces eaux présentent des conditions qui ressemblent à celles ayant existé au début du Paléozoïque. L'introduction de nutri-

ments a stimulé une rapide absorption du phosphore par le phytoplancton local – bien plus que nécessaire pour une croissance normale. Le contenu en nutriments de ces minuscules végétaux s'est enrichi en un peu plus d'une semaine.

Lors de la seconde expérience, James Elser, de l'Université d'État de l'Arizona, a fourni du phosphore à des communautés de cyanobactéries dans le courant marin de Coahuila, au Mexique. Ces cyanobactéries procèdent à la photosynthèse comme le font les plantes pour se développer. Elles sont similaires à des cyanobactéries qui vivaient durant le début du Paléozoïque. L'excédent de phosphore a provoqué un développement important des cyanobactéries, avec une hausse totale de la masse de matière organique. En outre, les escargots qui se nourrissent de ces cyanobactéries en ont bénéficié et leurs effectifs ont nettement augmenté.

Bien que ces expériences n'aient pas démontré de diversification des espèces (leur durée est trop courte), elles montrent que la hausse en disponibilité de nutriments clés dans les mers a pu accroître rapidement le contenu en nutriments du phytoplancton et que celui-ci pourrait avoir très vite transmis ces bénéfices vers le haut de la chaîne alimentaire à des animaux qui s'en nourrissaient. Ces derniers ont alors consacré plus d'énergie à la reproduction, prérequis à la diversification.

Un retour vers le Paléozoïque

Comprendre comment le phytoplancton réagissait à des conditions environnementales changeantes dans le passé pourrait aider les chercheurs à prévoir quel futur est réservé à la vie marine actuelle. Le dioxyde de carbone émis par les activités humaines réchauffe la planète et acidifie les océans. Dans les siècles à venir, les océans ressembleront, dans une certaine mesure, à ceux du Mésozoïque et du Paléozoïque. Ces modifications perturberont l'équilibre des populations de phytoplancton.

Dans l'océan profond, d'épais dépôts riches en carbonate de calcium, qui se sont formés par l'accumulation de coquilles de coccolithophoridés, auront tendance à neutraliser le dioxyde de carbone dissous. Mais dans les eaux de surface, les coccolithophoridés et d'autres organismes à éléments calcaires pourraient être menacés