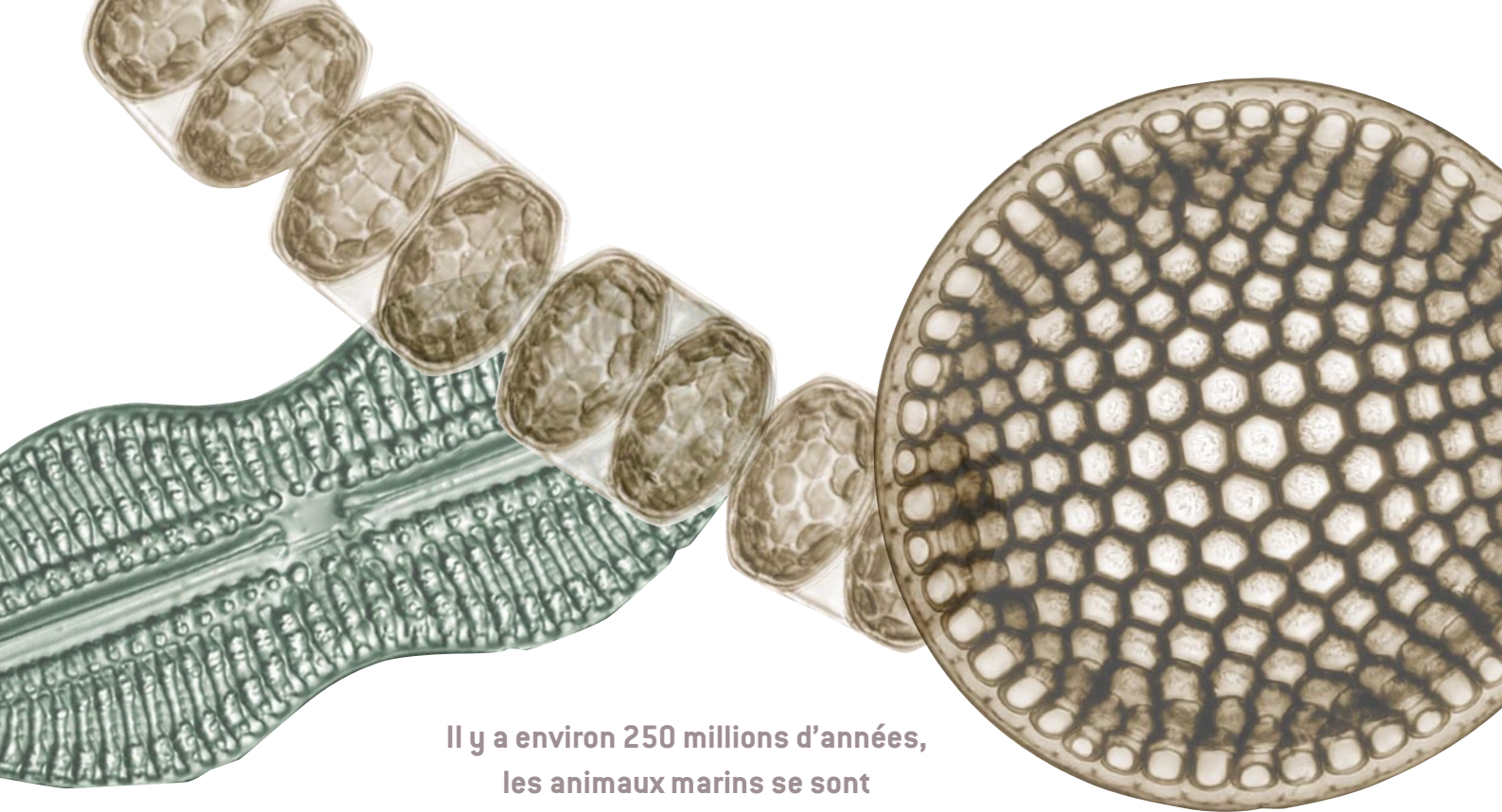
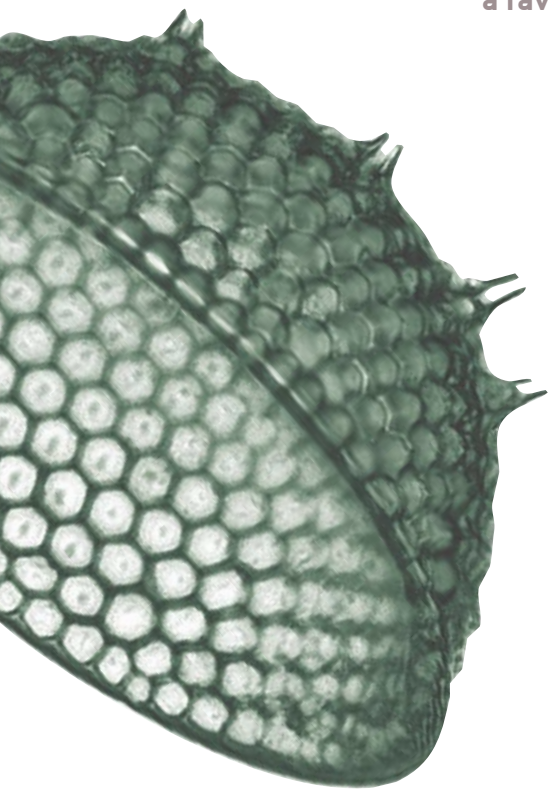




Il y a environ 250 millions d'années,
les animaux marins se sont
diversifiés rapidement. Le développement
du phytoplancton, des végétaux microscopiques,
a favorisé cet essor spectaculaire.

Ronald Martin et Antonietta Quigg



L'ESSENTIEL

- Après l'extinction massive des espèces marines survenue il y a 250 millions d'années, de nouvelles formes de vie très diverses se sont développées.
- Les biologistes ont attribué cette explosion évolutive à des facteurs physiques tels que le changement du niveau des mers.
- D'après plusieurs indices, le rôle du phytoplancton a été négligé. Son augmentation en quantité et en qualité nutritive aurait permis aux animaux marins modernes d'apparaître.

1. **DES DIATOMÉES** et d'autres organismes du phytoplancton de la lignée dite « rouge » ont commencé à remplacer le phytoplancton de la lignée « verte » il y a quelque 250 millions d'années.

© Charles Krebs

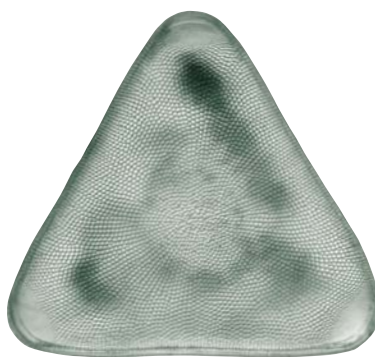
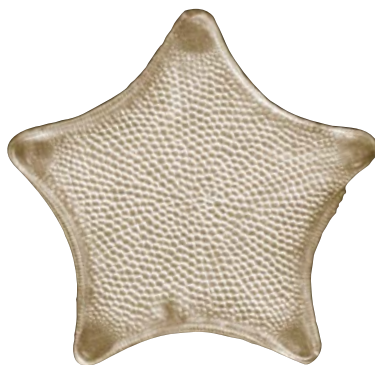
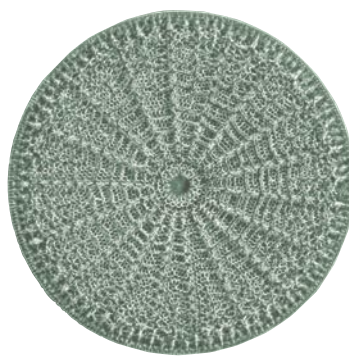
Si vous pouviez remonter le temps et visiter la Terre telle qu'elle était il y a 500 millions d'années, au Paléozoïque, vous ne reconnaîtriez pas votre planète. Les continents étaient, pour la plupart, concentrés dans l'hémisphère Sud ; les océans présentaient des configurations et des courants différents ; les Alpes et le Sahara n'étaient pas encore formés. Les plantes terrestres n'existaient pas. Une différence tout aussi notable concerne les animaux. La plupart des organismes multicellulaires vivaient en mer. Les maîtres des océans étaient les brachiopodes et les trilobites, des cousins disparus des crustacés et des insectes d'aujourd'hui, reconnaissables à leurs exosquelettes, leurs longues antennes et leurs yeux composés.

Après la crise, un boom des espèces

La diversité des animaux marins a augmenté progressivement jusqu'à l'extinction du Permien, il y a 250 millions d'années, qui a vu disparaître plus de 90 pour cent des espèces océaniques. Cela a mis fin à l'ère du Paléozoïque. Le vide laissé par cette catastrophe a entraîné une importante phase de réorganisation, au cours de laquelle s'est établie la domination de nouveaux groupes d'animaux, qui règnent aujourd'hui dans les mers. On retrouve, par exemple, les poissons prédateurs, les mollusques, les crustacés ou encore les oursins.

L'étude des fossiles présents dans les sédiments permet de recenser les espèces et d'estimer l'importance des différentes populations (voir l'encadré page 51). Ces analyses montrent qu'au Mésozoïque et au Cénozoïque, les ères qui ont suivi le Paléozoïque, la vie marine s'est diversifiée à un rythme sans précédent.

Pour expliquer cet essor, les chercheurs ont d'abord pensé que les fossiles les plus anciens avaient disparu sous l'effet de l'érosion, ce qui donnait l'illusion d'une diversification importante. Mais des travaux ultérieurs ont indiqué que cet épanouissement apparent d'espèces marines a été bien réel. Afin d'expliquer le phénomène, les biologistes ont étudié divers facteurs, notamment les changements climatiques et les variations du niveau de la mer, ainsi que l'extinction de certaines espèces, susceptibles de créer de nouvelles opportunités de développement. Pour-



tant, bien que tous ces éléments aient pu contribuer à la diversification amorcée il y a 250 millions d'années, ils ne peuvent à eux seuls être responsables de l'explosion évolutive observée.

Un autre facteur a été sous-estimé : la nourriture disponible sous forme de plantes microscopiques, le phytoplancton. L'étude des fossiles montre que le phytoplancton a connu, après la crise du Permien, une augmentation en quantité et en diversité. Les espèces se nourrissant de phytoplancton y ont trouvé d'abondants nutriments. Ainsi, le développement de ces végétaux microscopiques a accompagné la spectaculaire émergence de nouvelles créatures marines au Mésozoïque et au Cénozoïque.

Selon nous, l'évolution de ces plantes microscopiques, qui sont à la base de la chaîne alimentaire marine, a été le moteur du développement de la faune marine moderne. En outre, cette compréhension nouvelle de la façon dont le phytoplancton a transformé la vie dans les mers anciennes ouvre des pistes de réflexion sur l'avenir des océans actuels. Le phytoplancton reste un élément clé de la chaîne alimentaire ; mais qu'advient-il si les changements climatiques perturbent leur prolifération, comme ils ont déjà commencé à le faire ?

Source d'énergie

Comment le phytoplancton a-t-il joué un rôle crucial dans l'évolution des animaux marins ? Comme toutes les plantes, le phytoplancton exploite l'énergie du Soleil pour fabriquer de la matière organique grâce à la photosynthèse. De minuscules organismes herbivores dérivants – le zooplancton – se nourrissent du phytoplancton et sont à leur tour mangés par des prédateurs situés plus haut dans la chaîne alimentaire. L'azote, le fer, le phosphore et d'autres nutriments présents dans l'eau stimulent la croissance du phytoplancton. Plus ces nutriments sont disponibles, plus le phytoplancton croît et plus le zooplancton s'en nourrit et prolifère.

Non seulement le phytoplancton est plus abondant, il est aussi plus nutritif pour le zooplancton. Ces micro-organismes se développent et se reproduisent alors plus efficacement. Leurs populations augmentant, ils se dispersent et conquièrent de nouveaux territoires. Certaines populations se retrouvent isolées de leurs populations

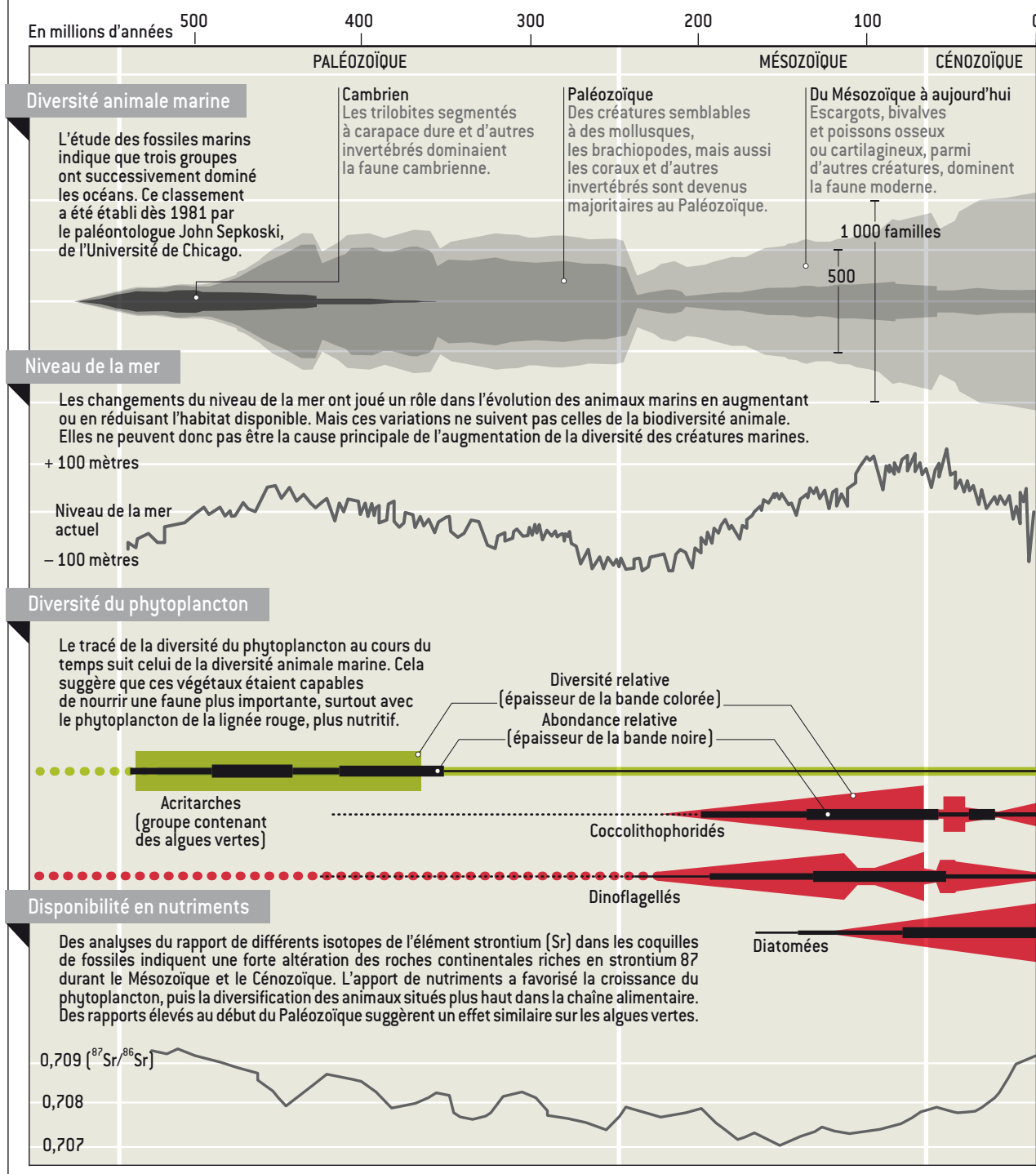
L'EFFET DU PHYTOPLANCTON

L'extinction massive qui marque la fin du Paléozoïque, il y a environ 250 millions d'années, a concerné plus de 90 pour cent des espèces marines (et 70 pour cent des espèces terrestres). Parmi les scénarios proposés pour expliquer cette crise, un volcanisme important – avec la formation de trapps en Sibérie, de vastes plateaux de basalte – a pu altérer le climat.

À la suite de cette crise, durant le Mésozoïque et le Cénozoïque, les animaux marins ont connu une forte diversification, atteignant un nombre d'espèces bien plus élevé qu'auparavant.

Les scientifiques ont d'abord attribué cette explosion à des facteurs physiques, tel le changement du niveau de la mer. Mais l'évolution du phytoplancton – les minuscules végétaux qui forment la base de la chaîne alimentaire marine – aurait joué un rôle important dans cet essor.

L'érosion continentale aurait fourni les éléments nécessaires au développement du phytoplancton, qui s'est multiplié et est devenu plus riche en nutriments. Le phytoplancton a ensuite nourri les autres espèces.



La première révolution du plancton

L'étude de l'évolution du phytoplancton se heurte à de nombreuses difficultés : définir précisément les différents groupes de phytoplancton et retrouver leurs traces. Il est toutefois possible de remonter jusqu'au Paléozoïque et même de montrer qu'une autre révolution planctonique a eu lieu bien avant celle du Mésozoïque évoquée par Ronald Martin et Antonietta Quigg.

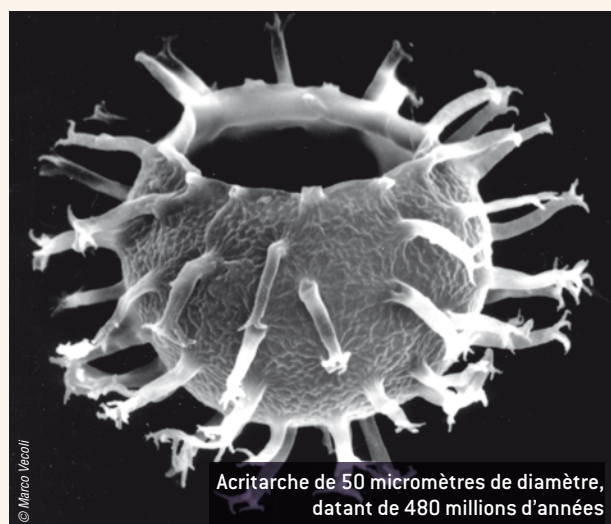
Le phytoplancton dans les océans actuels est formé de trois principaux groupes : les coccolithophoridés (avec une coquille en carbonate de calcium), les diatomées (avec des valves en silice) et les dinoflagellés (produisant des kystes en matière organique). L'analyse des fossiles permet de suivre leur évolution, mais seule une petite partie du phytoplancton est fossilisée. Martin Head, de l'Université de Brock, au Canada, et ses collègues ont ainsi estimé que seuls 17 pour cent des espèces actuelles de dinoflagellés fossilisent.

Peut-on savoir si ces trois groupes ont existé au Paléozoïque ? Cela pourrait être le cas des coccolithophoridés et des dinoflagellés. Ces derniers sécrètent, par exemple, une substance qui leur est spécifique et que l'on re-

trouve dans les sédiments du début du Paléozoïque.

Mais ces trois groupes de phytoplancton ne sont pas les seuls à jouer un rôle important. Le picoplancton se distingue par sa taille, inférieure à deux micromètres. Il est surtout constitué de bactéries – on parle aussi de bactérioplancton. L'enregistrement fossile de ce groupe est quasi inexistant. Même son rôle aujourd'hui dans les océans est mal connu. Pour certains chercheurs, il représenterait une masse de matière organique supérieure à celle des autres groupes.

Les trois groupes majeurs du phytoplancton moderne ne sont pas présents dans les sédiments antérieurs à l'extinction de la fin du Paléozoïque (aussi nommée extinction du Permien-Trias). Pourtant, le phytoplancton est bien présent au Paléozoïque sous d'autres formes, notamment d'acritarches, qui sont, avec leurs kystes en matière organique, les précurseurs en quelque sorte des dinoflagellés. Ces acritarches ont eu au Paléozoïque un rôle équivalent à celui du phytoplancton moderne au Mésozoïque et au Cénozoïque. Au Cambrien et à l'Ordovicien, ils se sont



Acritarche de 50 micromètres de diamètre, datant de 480 millions d'années

massivement diversifiés et ont servi de nourriture aux nouveaux groupes de zooplancton apparus à la fin du Cambrien (graptolites, chitinozoaires, radiolaires, foraminifères).

La vie s'est diversifiée rapidement pour atteindre ses plus hauts niveaux de diversité au Paléozoïque moyen. Ce phénomène a été encouragé par des niveaux marins élevés recouvrant des plates-formes continentales peu profondes, milieu propice au développe-

ment des organismes. On parle ainsi de la première « révolution du plancton ».

Il reste à rechercher la présence du phytoplancton calcaire et siliceux au Paléozoïque et à comprendre, notamment avec des méthodes de biomarqueurs, l'importance du bactérioplancton durant les époques géologiques lointaines.

Thomas Servais
UMR Géosystèmes,
CNRS-Université de Lille 1

originelles, ce qui, par le jeu des mutations et de la sélection naturelle, conduit à la formation de nouvelles espèces.

L'un des premiers indices qu'une forte hausse de l'abondance en phytoplancton a pu être partiellement responsable de l'explosion biologique après le Paléozoïque est apparu dans les années 1990. Des chercheurs, dont Richard Bambach, aujourd'hui à l'Institut Smithsonian, et l'un de nous (R. Martin), déduisirent à partir de l'analyse de fossiles d'animaux marins que la disponibilité en nourriture a nécessairement augmenté entre le Paléozoïque et le Cénozoïque. Cette conclusion reposait sur la constatation que les prédateurs et les autres espèces, qui consomment plus d'énergie que le zooplancton, ont représenté une proportion de plus en plus importante de la vie marine au fil du temps. Plus récemment, avec Victor Podkovyrov de l'Académie russe des sciences, nous avons trouvé des signes qui confortent cette hypothèse en observant des fossiles de plancton marin.

Nous avons montré qu'au Paléozoïque, un certain type de phytoplancton – les « algues vertes » – formait la base de la chaîne alimentaire marine, et que les prédateurs étaient relativement rares. Mais après que l'extinction massive du Permien a éradiqué l'essentiel des organismes marins, y compris la plupart des algues vertes, de nouvelles sortes de phytoplancton sont apparues, à commencer par les coccolithophoridés, ainsi nommés pour leur coquille en carbonate de calcium, ou « coccolithe », qu'ils sécrètent probablement pour se protéger. Ces organismes végétaux ont été bientôt rejoints par les dinoflagellés et les diatomées, qui allaient former le phytoplancton le plus varié et le plus abondant. Ces trois groupes – réunis sous le terme d'algues rouges, à cause du type de chlorophylle qu'ils utilisent lors de la photosynthèse – ont en grande partie remplacé les algues vertes du Paléozoïque, devenant ainsi la nouvelle ressource alimentaire du milieu marin.

Pourquoi les algues rouges ont-elles pris l'ascendant sur les formes vertes qui avaient survécu à l'extinction de la fin du Permien ? Des changements dans la disponibilité de micronutriments (des nutriments disponibles en faibles concentrations) utilisés dans la photosynthèse semblent avoir joué un rôle important.

Vert contre rouge

L'un de nous (A. Quigg) et ses collègues à l'Université Rutgers, aux États-Unis, ont analysé le contenu en micronutriments des algues vertes et rouges actuelles. Ils ont montré que les algues vertes ont de plus fortes concentrations en fer, zinc et cuivre que leurs homologues rouges. Ces dernières présentent de plus grandes quantités de manganèse, cobalt et cadmium. Ces différences suggèrent que, suivant les abondances des différents micronutriments, un type de phytoplancton s'est développé plus que l'autre.

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'enfonça 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

par l'acidification, qui réduit considérablement la disponibilité des minéraux nécessaires à leurs coquilles. Bien que de tels organismes aient enduré des changements environnementaux durant des centaines de millions d'années, l'augmentation du dioxyde de carbone est aujourd'hui si importante qu'ils ne seront peut-être pas capables de s'y adapter assez rapidement.

La perte de ces organismes renforcerait le réchauffement. Aujourd'hui, les efflorescences du coccolithophoridé *Emiliania huxleyi* peuvent couvrir des surfaces supérieures à 100 000 kilomètres carrés (voir la figure 2). Elles produisent des quantités notables de sulfure de diméthyle qui, passé dans l'atmosphère, déclenche la formation de nuages. Ces derniers, en réfléchissant la lumière du Soleil vers l'espace, refroidissent la planète. Sans les coccolithophoridés, la Terre absorberait plus d'énergie solaire qu'elle ne le fait déjà.

Le phytoplancton calcifiant qui se développe au sein des récifs sera doublement pénalisé par le dioxyde de carbone anthropogénique. Non seulement l'eau

acidifiée pourrait dissoudre leur squelette, mais le réchauffement de l'eau risque de dépasser leur seuil de tolérance et de les faire disparaître.

Des bouleversements à venir ?

Les émissions de dioxyde de carbone ne sont pas la seule menace que les hommes font peser sur le phytoplancton. L'érosion des sols due à la déforestation et d'autres activités humaines inonde les systèmes côtiers d'éléments nutritifs, conduisant à un développement excessif et à une décomposition importante de végétaux marins. L'équilibre actuel des récifs pourrait s'effondrer et mettre en péril la biodiversité.

En se réchauffant, les océans pourraient se stratifier de plus en plus : l'eau chaude en surface agit comme un couvercle sur l'eau froide, entravant ainsi les courants verticaux et la circulation de l'eau. Ces conditions favorisent les dinoflagellés et risquent d'augmenter les efflorescences toxiques dans les milieux côtiers.

L'étude des bouleversements du passé montre que l'équilibre des populations de phytoplancton est assez fragile et que les changements ont eu des répercussions importantes. Aujourd'hui, des chercheurs étudient, par exemple, les conséquences de la baisse d'oxygénation de l'eau dans le delta du Mississippi ou certains lacs sur le phytoplancton et, *via* un effet de domino, sur les animaux qui s'en nourrissent.

De tels travaux pourraient aider à mieux prévoir comment le phytoplancton et les espèces qui en dépendent se comporteront dans le futur. Ceux qui nient le changement climatique affirment souvent que la vie s'est régulièrement adaptée aux changements environnementaux dans le passé et qu'elle peut ainsi supporter de futures fluctuations ; cette façon de penser est inappropriée. Les activités humaines modifient les conditions océaniques à une vitesse inégalée dans l'histoire de la planète. Nous sommes donc malgré nous en train de mener une expérience inédite, dont l'issue ne sera pas connue avant qu'elle n'arrive à son terme. ■

france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélien Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2013 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. D. / Getty Images

Particules et champs sont-ils **REELS** ?

Les physiciens nous présentent un monde constitué de particules et de champs de force. Mais ces notions posent d'importantes difficultés d'interprétation. D'après certains chercheurs, le monde serait plutôt fait de propriétés, telles que la couleur ou la forme.

Les physiciens qui étudient la matière dans ses aspects les plus fondamentaux décrivent souvent l'Univers comme étant constitué de minuscules particules, plus petites que les atomes, qui s'attirent et se repoussent par l'intermédiaire de champs de force. Ils nomment « physique des particules » leur domaine de recherche et « accélérateurs de particules » ou « détecteurs de particules » leurs instruments. Ils se conforment à un modèle du monde rappelant les constructions d'un jeu de Lego. Mais cette vision passe sous silence un fait méconnu : en physique quantique, les notions de particule et de champ sont tellement distordues par rapport aux notions classiques que beaucoup pensent que le monde pourrait être formé de quelque chose d'entièrement différent.

Le problème n'est pas que les physiciens ne disposeraient pas de théorie valable du monde subatomique. Ils en ont une : la théorie quantique des champs. Les physiciens l'ont élaborée entre la fin des années 1920 et le début des années 1950, en cherchant à marier la mécanique quantique avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. La théorie quantique des champs fournit les fondements conceptuels du modèle

Meinard Kuhlmann

L'ESSENTIEL

■ On imagine souvent les particules élémentaires comme de petites billes. Mais cette image perd son sens en physique quantique.

■ Selon de nombreux physiciens, les particules ne sont pas des objets, mais des excitations d'un champ quantique. Toutefois, cette notion soulève elle aussi des difficultés.

■ Pour surmonter ces obstacles conceptuels, certains pensent que le monde n'est pas formé d'entités matérielles, mais de relations ou de propriétés telles que la masse, la charge et le spin.

standard de la physique des particules, qui décrit dans un cadre commun les constituants de la matière et trois de leurs quatre interactions fondamentales. En termes de précision empirique, c'est la théorie qui a été le plus couronnée de succès de toute l'histoire de la science. Les physiciens s'en servent quotidiennement pour calculer les résultats des collisions de particules, la synthèse des éléments au cours du Big Bang, les conditions extrêmes à l'intérieur des noyaux atomiques et bien d'autres choses encore.

Dans ces conditions, il peut paraître surprenant que les physiciens ne soient même pas sûrs du tableau fondamental et des concepts premiers que dépeint la théorie, autrement dit de son « ontologie ». Cet embarras est distinct des mystères largement débattus de la mécanique quantique (tel celui de savoir si un chat, dont le sort dépend d'une fiole de poison actionnée par un dispositif quantique, peut être à la fois mort et vivant).

Le fait que l'interprétation de la théorie quantique des champs soit une question non encore réglée entrave les progrès de ceux qui cherchent à sonder la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules : il est risqué de formuler une