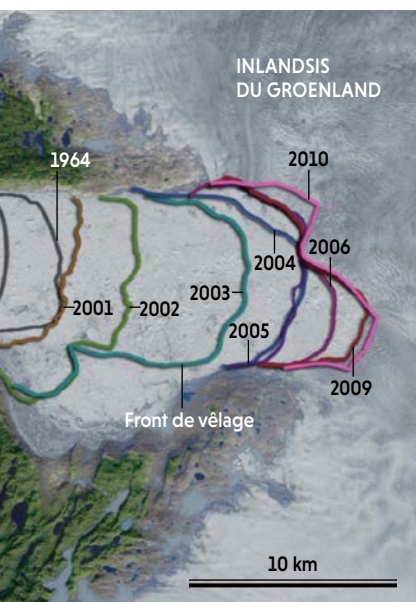




les bassins de Wilkes et d'Aurora, sont des cas différents. Le retrait de seulement l'un d'eux jusqu'à la proéminence précédant celle où ils sont installés aurait un effet mondial. Les modèles indiquent le glacier de Thwaites comme le chemin le plus probable vers la tranchée de Bentley et les bassins qui lui sont adjacents. Si, comme le Jakobshavn l'a fait, il commençait à se retirer vers l'intérieur de sa vallée, sa fonte pourrait, avant qu'il ne se soit réstabilisé au-dessus d'une zone élevée, faire monter le niveau de la mer de 3,3 mètres. Les bassins glaciaires de l'Antarctique oriental pourraient à eux seuls élever le niveau de la mer plus que le glacier de Thwaites, mais un réchauffement plus fort est nécessaire pour que s'amorce leur retrait des hauts-fonds marins qui les stabilisent actuellement.

Notons qu'il n'y a rien d'étrange à cela. Un réchauffement provoque le retrait de la glace, normalement jusqu'à la première proéminence en retrait. Ce phénomène a été observé à maintes reprises dans le passé et dans le présent. Si le glacier de Thwaites se réchauffe assez pour commencer à se comporter comme les glaciers du Groenland et de l'Alaska, alors il reculera.

UN SORT ENCORE INCERTAIN

À quelle vitesse le glacier de Thwaites pourrait-il évoluer? Quel réchauffement climatique pouvons-nous nous permettre sans qu'il ne commence à se retirer? Mes collègues David Pollard, de l'université d'État de Pennsylvanie, et Robert DeConto, de l'université du Massachusetts, ont élaboré un modèle physique d'écoulement de la glace, que l'on peut faire tourner sur de gros calculateurs afin d'obtenir des prédictions sur les évolutions à long terme des grandes calottes. Je les ai un peu aidés quant à la physique de l'effondrement des grandes falaises de glace, notamment dans les cas où de l'eau de fonte ouvre des crevasses.

David Pollard et Robert DeConto ont optimisé leur modèle afin qu'il décrive correctement les données géologiques du passé et afin d'évaluer les impacts de diverses intensités de réchauffement d'origine humaine. Ils ont déterminé que, même avec un réchauffement rapide, nous avons probablement quelques décennies avant que le glacier de Thwaites ne commence à s'effondrer à la suite de la perte de sa plateforme glaciaire et de l'élargissement de ses crevasses par la circulation de l'eau de fonte de surface. Il faudrait environ un siècle pour que le glacier de Thwaites s'effondre complètement.

David Pollard et Robert DeConto ne sachant pas à quelle vitesse la glace pouvait se briser, ils ont adopté un chiffre égal à celui du Jakobshavn. En fait, le glacier de Thwaites étant plus épais, il formera des falaises bien plus hautes que le Jakobshavn; or plus une falaise est haute, plus elle a tendance à se

disloquer. Il se pourrait donc que nous sous-estimions le pire des scénarios.

Le modèle fonctionne bien, mais David Pollard et Robert DeConto ou d'autres vont certainement l'améliorer encore. Il reste à espérer que le glacier de Thwaites pourra se stabiliser sur une proéminence située en arrière de son front actuel sur la pente descendante de la tranchée, plutôt que de reculer davantage. Ou encore, que les icebergs formés s'accumuleront pendant un certain temps derrière la crête actuelle où la glace commence maintenant à flotter. Cela pourrait conduire à la formation d'une banquise qui limiterait la perte de glace.

Pour répondre à ces questions et à d'autres, la National Science Foundation des États-Unis et le Natural Environment Research Council du Royaume-Uni ont lancé, en association avec des collaborateurs internationaux, un effort majeur pour en apprendre encore plus sur l'histoire du glacier de Thwaites, sur la façon dont il s'écoule et sur le fond marin sur lequel il progresse. Cela devrait nous aider à mieux prévoir son avenir.

Les données produites réduiront nos incertitudes, mais il restera difficile de répondre à certaines questions. Pensez à toutes les tasses à café en céramique que vous avez vues tomber sur un sol dur. Certaines rebondissent, d'autres se fendent et d'autres encore se brisent en mille morceaux. Les processus physiques à l'origine de ces divers types de fracturation sont bien connus et faciles à décrire, et le comportement moyen d'une fracture est prévisible. Cependant, jamais vous ne parieriez quelque chose d'important pour vous sur le sort de la prochaine tasse qui tombera...

L'avenir du glacier de Thwaites dépend beaucoup de la façon dont il se fracturera. Sa plateforme glaciaire va-t-elle se séparer de la glace qui l'alimente aujourd'hui, ce qui lui ferait dépasser la protubérance qui le stabilise actuellement et le ferait reculer dans de profonds bassins? D'énormes icebergs seront-ils débités si la perte de la plateforme de glace produit un front de vêlage plus haut que n'importe quelle falaise actuelle, entraînant un recul plus rapide que tout ce que nous avons jamais vu? L'eau de fonte est importante, mais quelle quantité d'eau s'écoulera dans les rivières jusqu'à la mer, et quelle quantité s'infiltrera dans la neige et regèlera? À quelle vitesse l'air se réchauffera-t-il? En comparaison, prédire le sort d'une tasse n'est pas difficile!

Si l'humanité parvient à se mobiliser assez, le ralentissement, voire l'arrêt, du réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre freinera la hausse du niveau de la mer et réduira le coût croissant des submersions côtières. Si toutefois le glacier de Thwaites devait commencer à se retirer rapidement, alors il sera urgent d'agir et de limiter les dégâts associés. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Milillo et al., **Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica**, *Science Advances*, vol. 5, eaau3433, 2019.

T. A. Scambos et al., **How much, how fast? : A science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites glacier in the 21st century**, *Global and Planetary Change*, vol. 153, pp. 16-34, 2017.

R. DeConto et D. Pollard, **Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise**, *Nature*, vol. 531, pp. 591-597, 2016.

R. Alley et al., **Oceanic forcing of ice-sheet retreat : West Antarctica and more**, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 43, pp. 207-231, 2015.

L'ESSENTIEL

> Les chercheurs ont longtemps pensé que les animaux complexes étaient apparus au cours de l'explosion du vivant survenue au Cambrien, il y a environ 540 millions d'années.

> Mais de plus en plus de fossiles suggèrent qu'en réalité, ils ont émergé des millions d'années auparavant, durant l'Édiacarien.

> De nouvelles techniques pour reconstituer la chimie des anciens océans ont livré des indices sur les pressions environnementales qui ont façonné cette diversification primitive.

L'AUTEURE



RACHEL A. WOOD
paléontologue et géologue
à l'université d'Édimbourg,
en Écosse

L'essor des premiers animaux

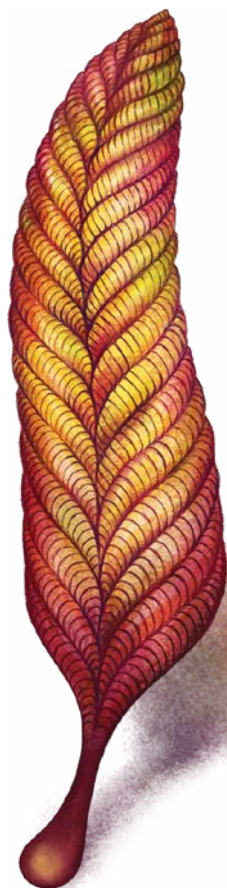
La découverte de nouveaux fossiles d'animaux complexes et l'analyse de la chimie des anciens océans révèlent les racines étonnamment lointaines de l'explosion cambrienne.

Grimpez en haut des falaises blanches et escarpées qui surplombent les grandes rivières de Sibérie. Au sommet, vos pieds fouleront les vestiges d'un tournant de l'histoire de la vie sur Terre: la limite géologique, vieille de 541 millions d'années, entre les périodes précambrienne et cambrienne. Les roches situées en dessous de cette ligne contiennent peu de restes fossiles: des empreintes fantomatiques d'organismes à corps mou et quelques formes de coquilles. Mais cassez n'importe quelle roche juste au-dessus de la limite, elle regorgera de coquilles. Un peu plus haut encore, des organismes fossilisés familiers, comme les trilobites, apparaissent. Ces changements documentent ce que l'on nomme l'explosion cambrienne, l'un des

événements les plus importants de l'évolution, mais qui reste encore mal compris.

Des décennies durant, les chercheurs ont pensé que l'origine des animaux complexes – des organismes multicellulaires aux tissus différenciés – remontait à l'explosion cambrienne. De fait, une profusion de formes nouvelles ont vu le jour à cette période, dont les ancêtres de beaucoup des groupes majeurs d'animaux actuels. Cependant, de récentes découvertes en Sibérie, en Namibie et ailleurs montrent que les animaux complexes sont en réalité apparus des millions d'années avant l'explosion cambrienne, au cours du dernier chapitre du Précambrien, une période appelée l'Édiacarien. Parmi ces découvertes, on compte les plus anciens organismes connus dotés de squelettes interne et externe composés de tissu >

Les plus anciens animaux complexes connus, vieux de plus de 550 millions d'années, avaient des formes variées et mesuraient quelques centimètres, voire plus.



> minéralisé, une innovation clé de l'évolution visible chez beaucoup des animaux actuels.

La présence de ces organismes équipés de leur « armure » si loin dans le passé – il y a 550 millions d'années – indique que les pressions écologiques et environnementales supposées avoir présidé à l'explosion cambrienne étaient déjà à l'œuvre bien avant. Découvrir comment ces facteurs ont modelé l'évolution des premiers animaux complexes durant l'Édiacarien est crucial pour comprendre l'incroyable explosion de diversification de la vie qui a suivi au cours du Cambrien.

Les registres fossiles du Cambrien ont fait l'objet de recherches intenses pendant plus de 150 ans. Les modèles généraux décrivant quand et où sont apparus les fossiles du Cambrien sont donc relativement bien établis : des fossiles similaires ont fait leur apparition sur de nombreux continents à peu près au même moment, et ils ont subi la même succession de changements évolutifs de façon plus ou moins synchrone. Mais ce n'est que récemment, à la lumière des découvertes des fossiles plus anciens de l'Édiacarien, que l'on commence à distinguer les racines de l'explosion cambrienne. Grâce, en partie, au développement de nouvelles techniques géochimiques qui ont révolutionné notre compréhension de la chimie changeante des océans de l'époque, on perçoit aussi pourquoi elle a eu lieu à ce moment.

Ce n'est que tout récemment que l'on a pu intégrer les informations issues des registres géochimique et fossile pour montrer comment la biosphère, la géosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, qui ensemble constituent le système Terre, ont fonctionné durant cette période. Mais l'on peut d'ores et déjà esquisser une image saisissante de la manière dont, des dizaines de millions d'années avant l'explosion cambrienne, le fond marin s'est peu à peu peuplé d'organismes toujours plus complexes, devenant le terreau de la vie animale telle que nous la connaissons.

LES PREMIERS ANIMAUX

La plus ancienne preuve de l'existence d'animaux ne vient pas de fossiles identifiables, mais de restes de composés organiques appelés biomarqueurs. Il y a une dizaine d'années, des géologues ont découvert l'un de ces biomarqueurs, une forme particulière de stérane, dans des roches très bien préservées d'une série sédimentaire connue sous le nom de Supergroupe de Huqf, à Oman, vieille d'au moins 650 millions d'années. Certains experts ont avancé que ces stéranes étaient propres à un groupe particulier d'éponges et que la présence de ces molécules dans les roches de Huqf documentait ainsi l'existence de ces animaux déjà à cette époque. Cependant, tous les chercheurs n'acceptent pas leur postulat. En effet, une étude publiée en

avril suggère que les stéranes seraient caractéristiques d'un groupe d'amibes unicellulaires.

Les plus vieilles traces susceptibles d'être des fossiles d'animaux, qui proviennent d'une couche géologique de roches du sud de la Chine nommée la Formation de Lantian et remonteraient à 635 millions d'années, sont contestées de la même manière. Certains pensent que ces minuscules formes à corps mou ont un lien de parenté avec les coraux ou les méduses, car ils présentent des structures en forme de tentacules ; mais la conservation de ces fossiles n'est pas suffisamment bonne pour en permettre une interprétation non équivoque, ce qui laisse de nombreux chercheurs dubitatifs sur le fait qu'ils correspondent à des animaux.

Les restes d'animaux les plus anciens sur lesquels presque tout le monde s'accorde sont les fossiles de Terre-Neuve, âgés d'environ 571 millions d'années. Ces animaux vivaient donc peu après la dernière glaciation de type « Terre boule de neige », qui a recouvert une bonne partie de la planète sous une couche épaisse de glace. Des organismes à corps mou mesurant jusqu'à un mètre de hauteur ou de largeur dominaient cette faune édiacarienne. Certains avaient la forme de grandes feuilles semblables à des plumes, avec des tiges verticales qui les ancrèrent au fond marin. D'autres s'étendaient sur le sol océanique, leur corps plat montrant une architecture fractale, avec des ramifications qui présentaient les mêmes

Des organismes à corps mou mesurant jusqu'à un mètre de hauteur dominaient cette faune

motifs à toutes les échelles. Tous ces plans d'organisation maximisent la surface, ce qui suggère que ces animaux absorbaient des nutriments issus de l'eau environnante.

Cette faible diversité de la faune a prévalu pendant plus de dix millions d'années. Mais ensuite, le cours de l'évolution animale s'est accéléré. Le registre fossile indique qu'il y a environ 560 millions d'années, le biote édiacarien a commencé à se diversifier et à inclure des formes mobiles qui peuplaient les mers peu profondes. Certains fossiles conservent des

marques d'éraflures qui suggèrent que ces animaux broutaient des tapis d'algues. D'autres se sont peut-être traînés à travers les algues, absorbant les nutriments *via* la face inférieure de leur corps. Les premières galeries apparaissent aussi à cette époque, preuve que les animaux avaient commencé à se mouvoir et à déplacer les sédiments du fond marin.

Les plus anciens fossiles révélant des squelettes externe et interne apparaissent soudain dans des roches calcaires (principalement constituées de carbonate de calcium) vieilles de 550 millions d'années. On trouve ces fossiles, déjà de tailles et de formes variées, dans des lieux aussi éloignés que la Sibérie, le Brésil et la Namibie. La présence, partout dans le monde et au même moment, de squelettes chez autant de groupes d'animaux sans liens de parenté témoigne d'une force évolutive majeure opérant à l'échelle mondiale. On ne connaît pas sa nature avec certitude, mais on en a une petite idée. Fabriquer un squelette est coûteux en énergie. Aussi, pour qu'un animal se lance dans une telle entreprise, les bénéfices doivent surpasser les coûts. Les raisons susceptibles de favoriser la présence de squelettes sont nombreuses, mais la principale est, de loin, le besoin de se protéger des prédateurs. Bien qu'il n'existe pas de preuve fossile de prédateurs de cette époque, l'apparition de squelettes pourrait refléter la première manifestation d'animaux qui en mangeaient d'autres à une large échelle.

UN ANCIEN CONSTRUCTEUR DE RÉCIFS

Des analyses récentes de ces anciens squelettes ont livré des indices séduisants sur l'aspect de leurs propriétaires et sur leur mode de vie. Connu à partir de fossiles de son délicat squelette tubulaire qui mesurait jusqu'à 70 millimètres de long et ressemblait à un empilement de cornets de glace, un organisme nommé *Cloudina* occupe une place importante dans nos reconstitutions des écosystèmes de l'Édiacarien. *Cloudina* a été découvert pour la première fois en Namibie en 1972, et on a longtemps pensé qu'il se développait fixé au fond marin. Mais ces dernières années, des chercheurs ont identifié de nombreux nouveaux spécimens de *Cloudina* dans des sites de par le monde, qui ont changé ce point de vue. Le travail de mon équipe sur des spécimens de Namibie a montré que *Cloudina* croissait de différentes manières. Il pouvait se fixer à des tapis de microbes liés aux sédiments mous du fond marin ou s'ancrer à des couches superposées de cyanobactéries. Mieux, les individus *Cloudina* étaient capables de se cimenter les uns aux autres et de former un récif. Cette découverte a permis d'établir que *Cloudina* était l'un des plus anciens animaux constructeurs de récifs, reculant le record de ce mode de vie de quelque vingt millions d'années.



Des fossiles clés d'animaux complexes proviennent de roches de l'Édiacarien sur les rives de la rivière Youdoma, en Sibérie (1) et en bordure du désert du Namib, en Namibie (2).

On ignore si *Cloudina* a un lien de parenté avec des constructeurs de récifs modernes, tels les coraux. Mais comme les coraux constructeurs de récifs, il vivait à proximité d'un certain nombre d'autres animaux. Des indices sur cette association étroite ont été retrouvés à partir d'autres fossiles à squelettes, découverts dans des roches du même âge que celles qui contiennent les fossiles de *Cloudina*. Un organisme nommé *Namacalathus*, connu dans divers sites fossilifères autour du globe, semble avoir été l'un des compagnons de *Cloudina*. Son squelette, qui pouvait atteindre 50 millimètres de long, était composé d'une délicate tige à paroi fine surmontée d'une coupe munie d'une ouverture centrale sur le dessus et de plusieurs autres sur les côtés. Les tissus mous de l'animal se trouvaient probablement en grande partie à l'intérieur de la coupe, bien qu'ils n'aient jamais été préservés. Les fossiles de *Namacalathus* indiquent qu'il croissait enraciné à un tapis microbien, souvent près de *Cloudina*.

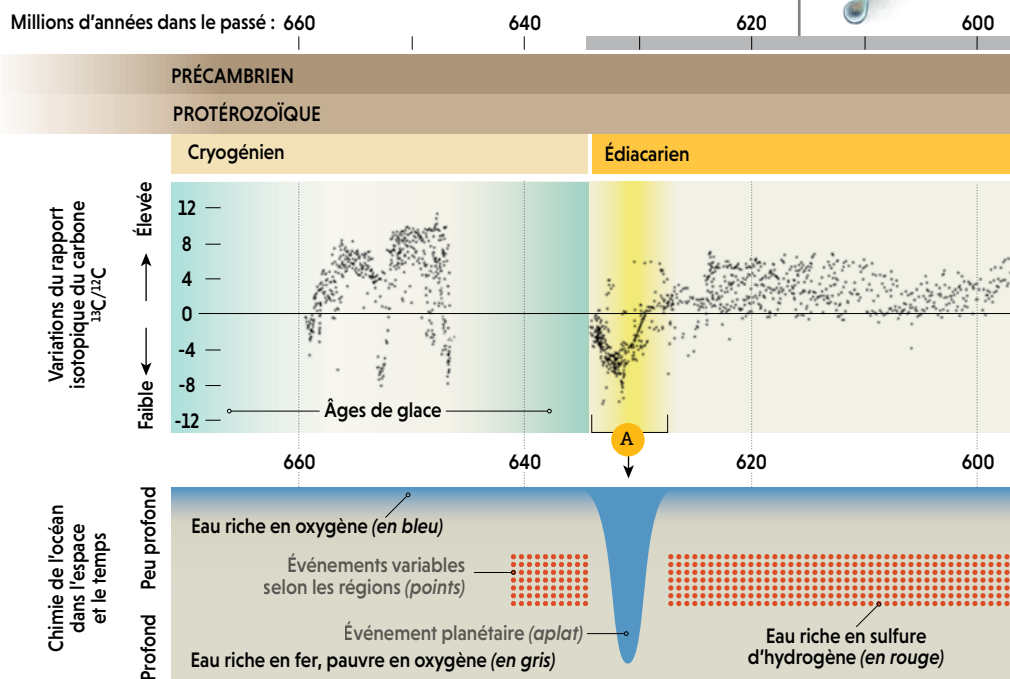
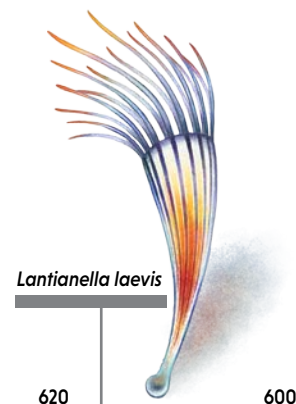
Namapoikia, un organisme connu uniquement à partir de sites namibiens, côtoyait lui aussi *Cloudina*. Cet animal est remarquable par ➤

AVANT L'EXPLOSION CAMBRIENNE

PREUVES GÉOCHIMIQUES

Les animaux ont besoin d'oxygène pour survivre. La diversification survenue au cours de l'Édiacarien a eu lieu alors que la concentration en oxygène dans les océans de la planète fluctuait beaucoup. L'étude des isotopes du carbone dans les roches de l'Édiacarien montre que le cycle de cet élément était instable et fluctuait beaucoup. Des analyses des diverses formes du fer présentes dans ces roches révèlent quant à elles que l'oxygène dissous dans les océans a probablement atteint un seuil ou une série de seuils au cours de l'Édiacarien, ce qui a permis aux animaux de se diversifier en comblant leurs besoins métaboliques, qui croissaient à mesure qu'ils devenaient plus actifs. Les chercheurs pensent désormais que les mers se sont oxygénées via non pas une augmentation lente et progressive, mais plutôt une série d'événements (A, B, C et D) qui semblent coïncider avec les variations des isotopes du carbone. Cette tendance s'est poursuivie durant l'Édiacarien et probablement bien au-delà.

De nombreuses innovations clés de l'évolution animale, que l'on pensait remonter au Cambrien, ont en réalité trouvé leur origine bien plus tôt, au cours de l'Édiacarien. Par exemple, les premiers animaux à squelette sont apparus à cette époque. Au fil de l'évolution, leur capacité à produire du tissu minéralisé est probablement devenue un moyen de protection contre les prédateurs. L'analyse des registres fossiles et géochimiques d'il y a entre 670 millions et 480 millions d'années livre des indices sur les facteurs environnementaux qui ont modelé cette ancienne activité évolutive.



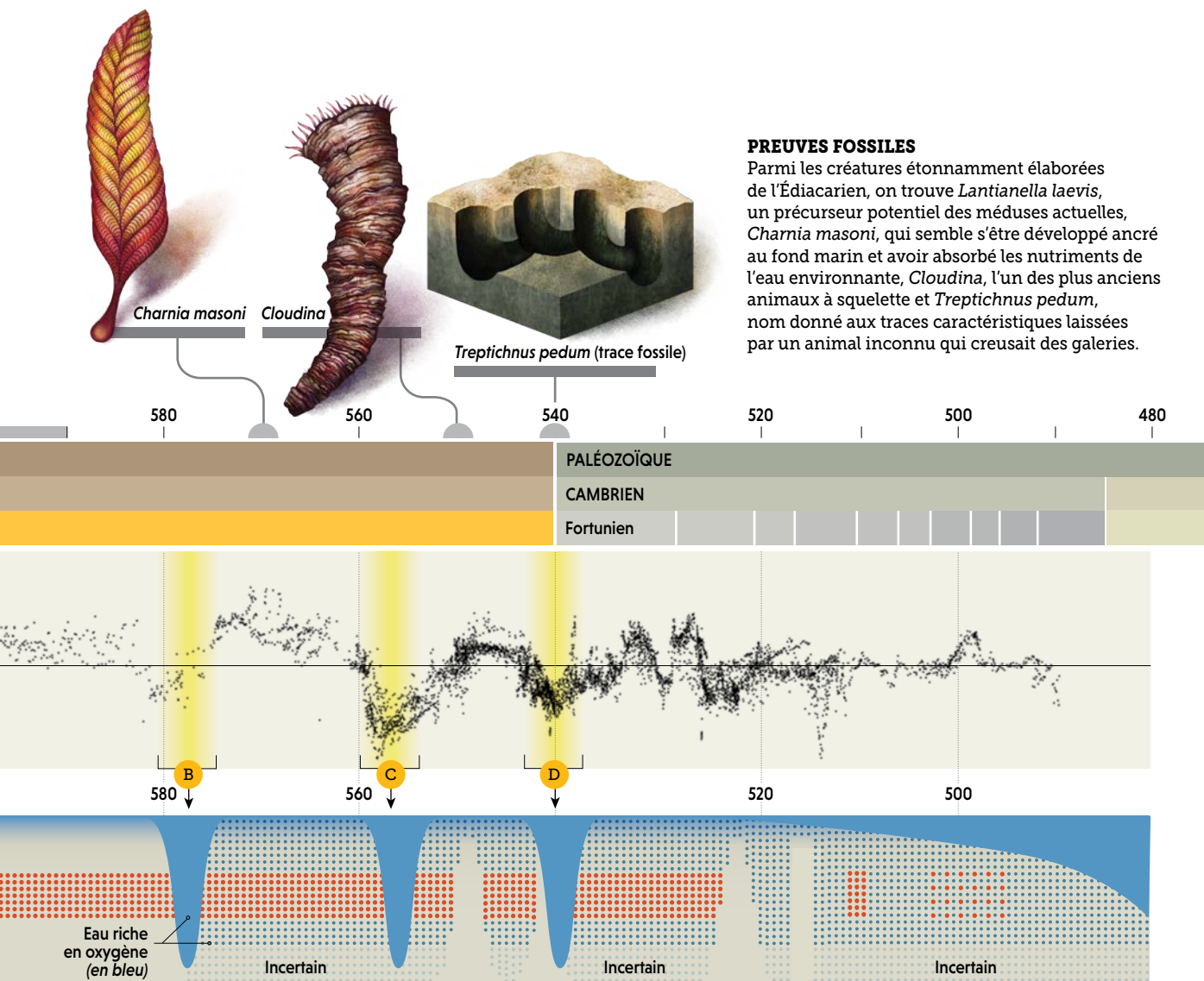
> sa grande taille – jusqu'à un mètre de diamètre – et son squelette robuste. D'après sa forme, nous pensons que *Namapoikia* était une éponge et arborait ainsi un squelette interne et non externe, comme c'était probablement le cas de *Cloudina* et *Namacalathus*. Curieusement, *Namapoikia* se développait dans les recoins cachés des récifs, s'incrétant dans les parois verticales des fissures et des crevasses ouvertes. Dans les récifs actuels, les communautés d'animaux et de plantes vivant à la surface de ces édifices diffèrent de celles qui occupent les grottes, les crevasses et le dessous des falaises. Nos découvertes de fossiles édiacariens indiquent que cette distinction est aussi ancienne que les récifs d'origine animale eux-mêmes.

Ces observations sont importantes, car la construction de récifs représente une innovation écologique essentielle. En se développant à proximité, voire en se soudant ensemble, les individus deviennent mécaniquement plus forts, s'élèvent au-dessus du fond marin à l'écart des

concurrents, augmentent l'efficacité de leur prise de nourriture et acquièrent une protection contre les prédateurs. Ainsi, comme l'apparition des tout premiers squelettes dans les registres fossiles de l'Édiacarien, celle de récifs pourrait indiquer que des pressions écologiques complexes grandissantes étaient déjà à l'œuvre. L'explosion cambrienne, ainsi qu'une course aux armements entre proies et prédateurs, avait donc peut-être déjà commencé.

LE RÔLE CLÉ DE L'OXYGÈNE

Au milieu des années 2010, il est devenu clair que le Cambrien ne se démarquait pas aussi clairement de l'Édiacarien que les experts l'avaient longtemps envisagé. Non seulement des chercheurs avaient commencé à accumuler des preuves indiquant que les squelettes et les récifs étaient apparus plus tôt qu'on ne le pensait, mais nous avons aussi développé des modèles d'écosystèmes montrant que les communautés animales de l'Édiacarien partageaient de nombreux



traits écologiques avec celles du Cambrien. La mèche qui avait allumé l'explosion cambrienne se révélait bien plus longue qu'on ne le pensait.

Puis, il y a quelques années, certaines découvertes clés en Sibérie et en Chine ont brouillé encore davantage les frontières entre les mondes édiacarien et cambrien. En 2016, Ben Yang, de l'Académie chinoise de sciences géologiques, à Beijing, et des collègues chinois et allemands ont montré que *Cloudina* avait perduré durant le Cambrien. Mon groupe, quant à lui, avec des collègues de Russie et de Chine, a découvert en 2017, dans des roches édiacariennes, des fossiles que l'on pensait propres au Cambrien. Pour nous, ces découvertes signifiaient une chose: pour résoudre le mystère de l'explosion cambrienne, nous devions comprendre les dynamiques du monde édiacarien qui avaient donné naissance à ces animaux.

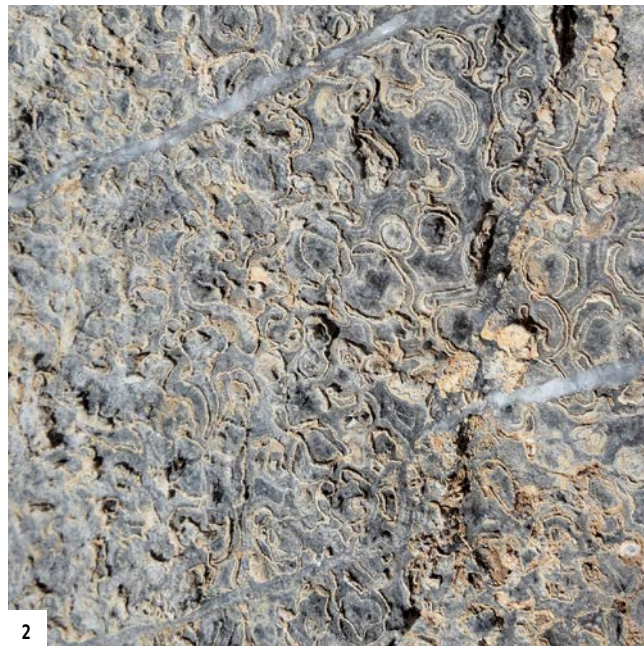
Le rôle potentiel des variations de l'oxygène disponible dans ces dynamiques, en particulier, intéressait les chercheurs. En effet, les animaux

ont besoin d'oxygène. Aussi, une question centrale, ces dernières années, a consisté à déterminer si, à un moment de la période couvrant l'Édiacarien et le Cambrien, la concentration en oxygène dans les océans a augmenté au-delà d'un certain seuil critique qui aurait permis aux animaux d'y prospérer. La question est plus compliquée qu'elle n'en a l'air, car les animaux n'ont pas tous les mêmes besoins en oxygène. Les organismes simples et immobiles, comme les éponges, sont susceptibles d'avoir besoin de moins d'oxygène que les animaux mobiles, et ils en ont certainement moins besoin que les prédateurs actifs et qui nagent vite. Nous avons gardé cela à l'esprit au cours de nos recherches.

Par chance, nombre de nouvelles méthodes géochimiques pour estimer la quantité d'oxygène dans ces mers anciennes se sont développées ces dernières années. Une technique particulièrement efficace, la spéciation du fer, exploite les caractéristiques des diverses formes du fer, qui se comportent différemment



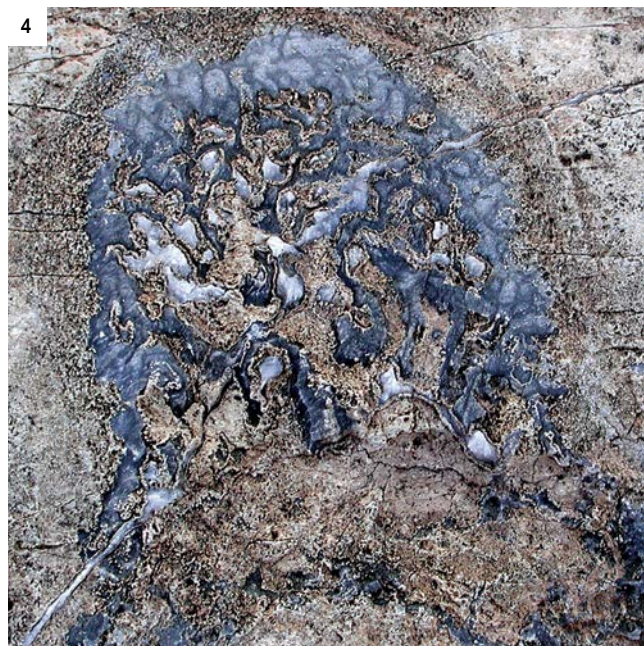
1



2



3



4

Cloudina est l'un des plus anciens organismes dotés d'un squelette externe. Il est connu grâce à des fossiles qui préservent sa délicate « armure » tubulaire (1). Les individus *Cloudina* étaient capables de se cimenter les uns aux autres et de former des récifs. *Namacalathus* est un autre organisme primitif possédant un squelette, dont les parties dures en forme de coupe sont préservées en masse (2). *Cloudina* et *Namacalathus* sont souvent retrouvés ensemble (3). *Namapoikia*, une éponge primitive, était l'un des autres compagnons de *Cloudina* et se développait dans les failles cachées des récifs (4).

> en présence ou en l'absence d'oxygène. Cette méthode permet de voir à une échelle locale où et quand la quantité d'oxygène était suffisante pour subvenir aux besoins d'une vie complexe. Les études menées en utilisant cette approche ont conduit à un large consensus : l'oxygène dissous dans l'océan a probablement atteint un seuil ou une série de seuils au cours de l'Édiacarien, ce qui a permis aux animaux de se diversifier en comblant leurs besoins métaboliques, qui croissaient à mesure qu'ils devenaient plus mobiles et actifs.

Les chercheurs ont désormais rassemblé assez de données géochimiques pour que l'on reconstitue la répartition de l'oxygène non seulement dans les différents sites édiacariens d'une

même époque, mais de façon globale au cours du temps. Au fil de l'Édiacarien et du début du Cambrien, ce travail révèle des répartitions qui diffèrent notablement de celle d'aujourd'hui, avec de nombreuses zones constituées d'une couche fine d'eaux peu profondes bien oxygénées, au-dessus d'une couche plus épaisse d'eau de mer plus profonde et probablement totalement dénuée d'oxygène – un état dit anoxique.

Ces données géochimiques montrent également que la frontière entre les eaux anoxiques et oxygénées était particulièrement dynamique au cours de cette période, s'élevant et s'abaissant avec les variations du niveau marin. Les zones du fond marin peu profond habitables pour les animaux primitifs étaient par conséquent encore >

UNE EXPLOSION DE VIE POSTGLACIAIRE



À la base de la butte de Nankoweap, dans le Grand Canyon, de fins bancs calcaires alternent avec des niveaux argileux. Les biomarqueurs proviennent de la matière organique contenue dans ces derniers.

Comme le précise Rachel Wood, l'avancée des techniques d'analyse a permis aux paléontologues et aux géologues d'effectuer un pas majeur dans la compréhension de l'origine de la vie sur Terre et de son évolution. Outre les informations paléontologiques, qui fournissent un aperçu fragmentaire de la biodiversité à un moment précis de l'histoire de la planète, de nouvelles techniques géochimiques et isotopiques aident les chercheurs à reconstituer les environnements dans lesquels les organismes évoluaient. Température, salinité, quantité d'oxygène sont autant d'indices qui relient environnement et biodiversité.

Aujourd'hui, grâce à ces techniques, on s'aperçoit que le vivant était bien plus diversifié qu'on ne le pensait durant l'Édiacarien (il y a entre 635 millions et 542 millions d'années). On va même plus loin. L'Édiacarien fait directement suite à un épisode glaciaire extrême, nommé «Terre boule de neige», ayant recouvert la planète entière de glace pendant plusieurs millions d'années. Or, au début des années 1970, les paléontologues américains Stephen Jay Gould et Niles Eldredge ont proposé une hypothèse de travail, dite des équilibres ponctués, selon laquelle l'évolution n'est pas progressive, mais se fait par périodes d'évolution rapide entrecoupées de périodes de stabilité, les pressions environnementales favorisant l'évolution rapide par sélection naturelle. Longtemps critiquée, cette hypothèse est devenue incontournable dans la théorie actuelle de l'évolution,

appuyée par des champs récents de la biologie comme la génétique et l'épigénétique. Il est ainsi probable que le goulet d'étranglement qu'ont représenté les épisodes de type Terre boule de neige ait joué un rôle primordial dans le façonnement de la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Pour reconstruire la biodiversité et l'environnement juste après l'épisode qui a marqué le début de l'Édiacarien, devant le manque de fossiles dans les niveaux géologiques correspondants, nous nous sommes tournés vers une technique d'extraction de fossiles moléculaires nommés biomarqueurs. Cette

Les glaciations de type Terre boule de neige ont eu un rôle majeur dans l'évolution de la vie

technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. En 2017 et en 2019, grâce à cette technique, nous avons relié ces épisodes glaciaires à deux évolutions biologiques importantes.

La première montre l'apparition à cette période d'une molécule, le 24-éthyl-stérol. Cette molécule rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette

innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète. La deuxième révèle qu'au lendemain de la glaciation, un changement radical s'est opéré dans les écosystèmes : l'évolution concomitante de différents biomarqueurs suggère que la Terre est passée d'un monde majoritairement bactérien à des écosystèmes dominés par des algues unicellulaires qui, d'après l'ampleur du phénomène, ne s'étaient pas contentées d'entrer en compétition avec les bactéries pour s'alimenter, mais s'en étaient elles-mêmes nourries. En d'autres termes, l'émergence de la prédation à l'échelle des microorganismes avait alors, déjà, drastiquement modifié les écosystèmes.

Les glaciations ont longtemps été vues comme des causes d'extinction massive d'espèces. Nous commençons tout juste à comprendre leur rôle de catalyseur de l'évolution. Il reste maintenant à préciser la chronologie des différents événements qu'elles ont causés en étudiant notamment les sédiments du Grand Canyon ou de la vallée de la Mort, qui représentent de véritables archives sédimentaires de ces périodes clés de l'histoire de notre planète. Peut-être, alors, arriverons-nous à relier ces événements à ceux qui, durant l'Édiacarien et le Cambrien, ont conduit à l'explosion des animaux complexes.

PIERRE SANSJOFRE

Laboratoire Géosciences océan, université de Bretagne occidentale, Brest

L. M., van Maldegem *et al.*, *Nature Commun.*, vol. 10(1), article 476, 2019; Y. Hoshino *et al.*, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017

> plus réduites que les chercheurs ne l'attendaient; elles constituaient de véritables oasis d'eau riche en oxygène. Comment ces facteurs ont-ils pu modeler l'extraordinaire diversification apparue à cette époque?

LES FLUCTUATIONS DE L'OXYGÈNE, UN MOTEUR DE L'INNOVATION?

Les périodes d'anoxie accrue du fond marin coïncident avec certaines extinctions de masse bien connues, comme celle qui a marqué la fin du Permien, il y a 252 millions d'années, au cours de laquelle 90% des espèces marines ont disparu. Mais plusieurs diversifications majeures ont débuté durant de longues périodes d'anoxie fluctuante des eaux peu profondes, notamment les diversifications de l'Édiacarien-Cambrien, de l'Ordovicien (100 millions d'années plus tard) et de la seconde moitié du Trias, il y a environ 247 millions d'années. Considérant ces événements, mon collègue Doug Erwin, de la Smithsonian Institution, et moi avons émis l'hypothèse que les conditions mouvantes en oxygène avaient pu créer des occasions propices à la fixation d'innovations évolutives chez les animaux à corps mou.

Il est bien plus simple pour les animaux de fabriquer un squelette de calcaire – le matériau qui constitue les squelettes et coquilles de nombreux organismes marins modernes – lorsque la concentration en oxygène dans l'eau de mer est supérieure à dix micromoles par litre. Les animaux à corps mou n'ont peut-être été capables de fabriquer ces squelettes de carbonate de calcium que lorsque la concentration en oxygène a atteint un tel seuil, permettant à des oasis auparavant isolées de s'étendre, de se connecter et de parvenir à une stabilité à l'échelle de la planète.

Il reste beaucoup à découvrir sur la façon dont la vie a réagi aux variations de la disponibilité en oxygène à l'échelle de l'évolution. Cette réaction était probablement compliquée, car les animaux étaient aussi soumis à d'autres facteurs, comme l'augmentation de la prédation. De plus, des rétrocontrôles entre les organismes, les écosystèmes et, plus largement, le système planétaire, dont on sait peu de choses, figuraient probablement aussi dans l'équation.

Nous avons du pain sur la planche. Des variations spectaculaires dans les processus régionaux qui ont modelé la croûte terrestre au cours de l'Édiacarien et du Cambrien ont produit de nombreuses lacunes importantes dans les registres fossile et géologique. Par conséquent, pour reconstituer l'histoire de l'essor des animaux complexes, nous devons assembler les données collectées dans une multitude de sites tout autour du monde. Le fait que beaucoup des sites clés de l'Édiacarien soient mal datés complique encore davantage la tâche. Habituellement, nous datons les roches de cette

époque en mesurant le rapport plomb/uranium dans les cristaux de zircon des couches de cendres d'anciennes éruptions volcaniques retrouvées à proximité. Il s'agit de l'une des quelques méthodes qui fournissent un âge absolu, radiométrique, pour une roche donnée. Malheureusement, nombre des successions sédimentaires que nous connaissons le mieux

Les squelettes n'ont peut-être pu apparaître qu'à partir d'un certain seuil en oxygène

sont dépourvues de telles couches. En conséquence, nous sommes incapables de corréliser avec précision les changements évolutifs survenus dans différentes parties du monde, ce qui est essentiel pour créer une chronologie fiable des événements. Un exemple de cette difficulté est la Formation de Lantian, en Chine, qui a livré des animaux fossiles candidats pour être les plus anciens connus, mais dont l'âge remonte à n'importe quelle période entre 635 et 590 millions d'années et est toujours très débattu.

Néanmoins, il existe des raisons d'être optimiste. De nouvelles couches de cendres sont mises au jour et les méthodes de datation sont affinées. Par exemple, les couches de cendres que de nombreuses équipes utilisent pour déterminer les âges des fossiles édiacariens découverts en Namibie ont récemment été redatées et les plus récentes – celles les plus proches de la frontière Précambrien-Cambrien – se sont révélées plus jeunes de plus de deux millions d'années qu'on ne le pensait. Ce qui a des répercussions sur la correspondance réelle entre ces fossiles et leurs homologues de Terre-Neuve et de Sibérie, entre autres. De plus, des géochimistes développent de nouvelles techniques isotopiques et d'autres méthodes susceptibles d'améliorer notre compréhension de l'oxygénation des océans de ce monde ancien. Enfin, mon équipe et d'autres découvrent de nouveaux fossiles dans des lieux reculés et jusqu'ici largement inexplorés, comme la Sibérie. Gageons que dans un futur pas si lointain, quand nous nous tiendrons sur ces falaises, contemplant la grande forêt en contrebas, notre compréhension de cette tranche de temps si extraordinaire sera bien plus profonde. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Wood et al., **Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian explosion**, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 3, pp. 528-538, 2019.

M. Zhu et al., **A deep root for the Cambrian explosion : Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform**, *Geology*, vol. 45(5), pp. 459-462, 2017.

R. Tostevin et al., **Low-oxygen waters limited habitable space for early animals**, *Nature Communications*, vol. 7, article n° 12818, 2016.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio