

> carbonatés qui stockent d'importantes quantités de carbone (voir l'illustration ci-dessous).

LA PISTE DU CO₂

Dans ce cycle long, la source de carbone (le volcanisme) est indépendante du climat. Ce n'est pas le cas des processus qui piègent le carbone : l'altération des roches dépend de la température et du ruissellement des eaux. C'est cette propriété qu'utilisa Joseph Kirschvink dans son scénario : lorsque la glaciation s'est généralisée, les températures extrêmement froides et l'absence d'eau liquide ont stoppé l'altération des roches, mais les volcans ont continué à émettre du CO₂. Le gaz s'est accumulé dans l'atmosphère et a intensifié l'effet de serre jusqu'à ce que ce dernier contrebalance l'effet d'albédo, provoquant une fonte rapide et brutale des glaces. La glace disparaissant, l'effet refroidissant causé par le fort albédo des glaces s'est atténué, ce qui a accéléré la fonte. Libérée de sa glace, mais avec une atmosphère encore très riche en CO₂, la Terre a alors brutalement quitté son climat glacial pour un climat tropical généralisé.

Ce scénario restait cependant très fragile, car seule la formation d'Elatina témoignait de la présence de glaces aux basses latitudes. Séduit par cette hypothèse, Paul Hoffman, géologue à l'université Harvard, aux États-Unis, partit alors à la recherche de vestiges de ces événements passés afin de vérifier sa vraisemblance. Accompagné de son étudiant en thèse, Galen Halverson, il élaborait, au terme de six années d'une exploration minutieuse, la théorie de la Terre boule de neige, qu'il présenta en 1998 (voir l'entretien page 32).

Depuis, cette théorie est devenue un sujet scientifique majeur. Nombre de problèmes concernant la Terre boule de neige ont été élucidés la décennie suivante. De nombreuses séries de dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque ont

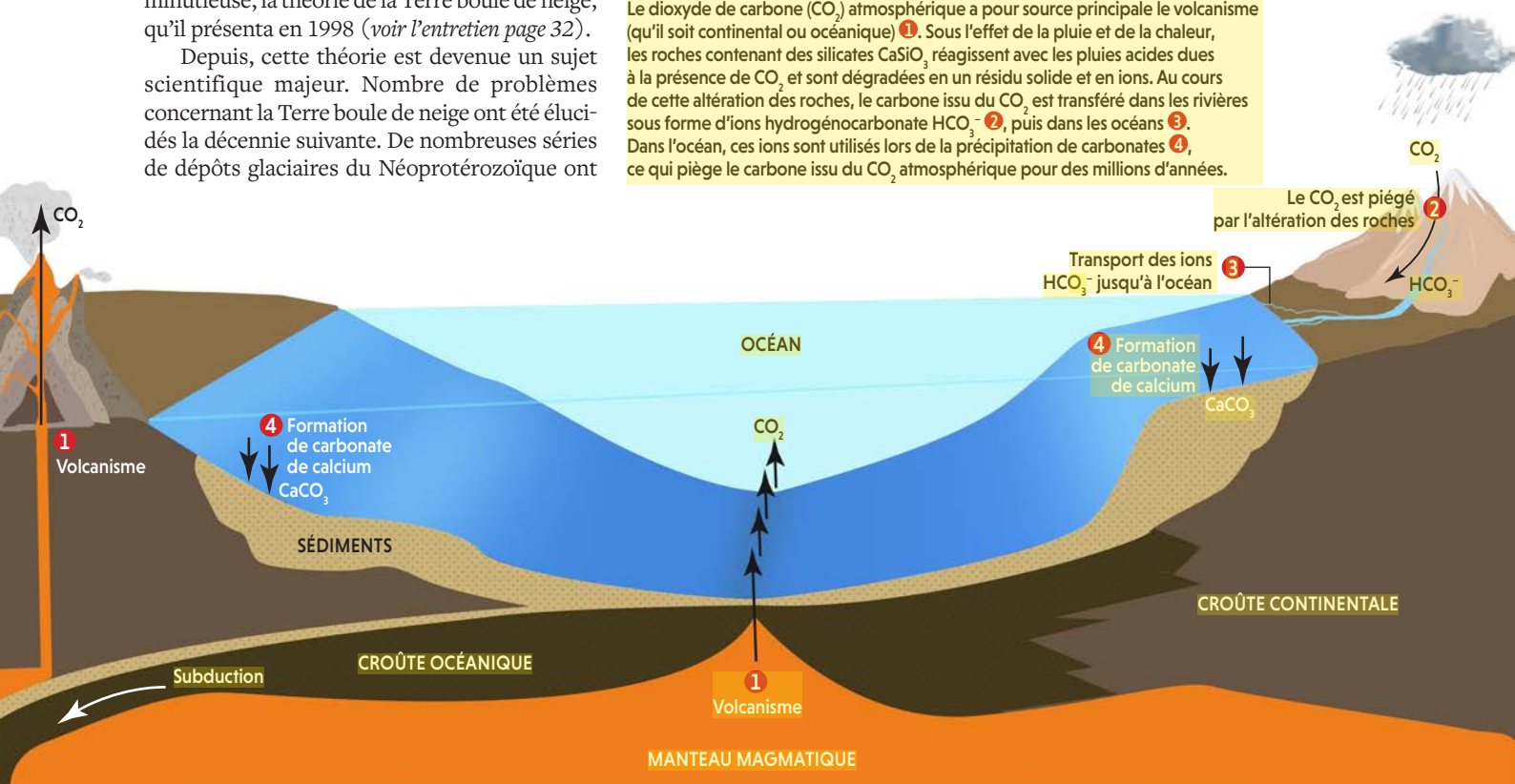
été découvertes sur tous les continents, et l'amélioration des techniques de datation a permis notamment de montrer leur synchronicité. On a ainsi mis en évidence deux épisodes glaciaires extrêmes de plusieurs millions d'années, datés respectivement de 717 et 649 millions d'années, qui semblent bien avoir été généralisés (et un autre épisode plus ancien, voir l'encadré page 29), et des mécanismes conduisant à l'entrée et à la sortie de chacun ont été proposés à partir de ces données. Cependant, il restait à comprendre comment les organismes photosynthétiques avaient survécu, et comment la vie pluricellulaire avait même profité de ces glaciations extrêmes.

On sait depuis longtemps, grâce à l'exploration des environnements polaires, que nombre d'organismes, surtout microscopiques, survivent au froid et à l'absence saisonnière de lumière. Dès le début des années 2000, les scientifiques se sont donc demandé quelles contraintes supplémentaires, par rapport à ces conditions déjà extrêmes, une Terre entièrement gelée aurait imposées aux organismes. Deux contraintes majeures sont apparues.

La première concerne l'épaisseur de la glace de mer et le blocage du rayonnement solaire. La banquise polaire actuelle est peu épaisse, et son extension limitée par sa fonte saisonnière. Sur une Terre entièrement gelée, c'est différent. Les températures extrêmement basses des pôles

LE CYCLE LONG DU CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique a pour source principale le volcanisme (qu'il soit continental ou océanique) ①. Sous l'effet de la pluie et de la chaleur, les roches contenant des silicates CaSiO₃ réagissent avec les pluies acides dues à la présence de CO₂ et sont dégradées en un résidu solide et en ions. Au cours de cette altération des roches, le carbone issu du CO₂ est transféré dans les rivières sous forme d'ions hydrogénocarbonate HCO₃⁻ ②, puis dans les océans ③. Dans l'océan, ces ions sont utilisés lors de la précipitation de carbonates ④, ce qui piège le carbone issu du CO₂ atmosphérique pour des millions d'années.



(simulées par les modèles du climat) conduisent à la formation d'une épaisse banquise qui ne fond pas durant l'été. La modélisation numérique indique que cette banquise, d'épaisseur supérieure à un kilomètre aux pôles, flue rapidement vers l'équateur à raison de plusieurs mètres par an. À l'équateur, elle est légèrement moins



Le monde vivant de l'époque était dominé par les algues unicellulaires



épaisse, car sublimée par la forte insolation durant la journée, c'est-à-dire directement convertie en vapeur. Mais même amincie, la banquise demeure trop épaisse (plus de 700 mètres) pour qu'une fraction du rayonnement lumineux incident parvienne à l'océan liquide. Or en l'absence de lumière, la photosynthèse ne peut se dérouler. Par conséquent, aucune forme de vie fondée sur cette forme de métabolisme ne peut survivre en milieu marin. Pourtant, le monde vivant de cette époque, essentiellement microscopique, est dominé par les algues unicellulaires et autres cyanobactéries, c'est-à-dire des organismes photosynthétiques...

Seconde contrainte: l'absence d'apport de nutriments à l'océan. Aujourd'hui, une part importante des nutriments nécessaires à la survie des organismes marins provient de l'altération des continents, les rivières et les vents charriant jusqu'à l'océan les éléments minéraux nécessaires à tout organisme (notamment le phosphore). Sur une Terre entièrement gelée, l'érosion est stoppée, ou du moins très fortement diminuée du fait de la quasi-absence d'eau liquide sur les continents. Or en 2009, Gordon Love, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont proposé, à partir de traces de biomarqueurs repérées dans des sédiments d'Oman, que des animaux aquatiques – les cnidaires et les démosponges – soient apparus entre les deux glaciations extrêmes du Néoprotérozoïque. Comment se seraient nourris ces organismes marins sans les apports liés à l'érosion?

D'autres théories que la Terre boule de neige ont alors été proposées pour expliquer la survie des organismes, par exemple une version

«allégée» du modèle, où une bande d'océan équatorial libre de glace aurait subsisté. Cependant les modèles numériques ont montré que ces scénarios n'étaient pas stables sur des longues durées. Les chercheurs se sont donc orientés vers une autre piste: puisque la Terre boule de neige semblait bien avoir existé, il fallait trouver un mécanisme qui aurait pu autoriser la formation d'eau libre durant une glaciation totale. Une solution consistait à rechercher un mécanisme capable d'abaisser l'albédo de la glace: cela aurait augmenté sa température et ainsi limité son épaisseur, par sublimation. Et, à terme, dans les zones de forte insolation, de l'eau libre se serait formée.

LE POUVOIR DE LA POUSSIÈRE

Les raisons d'une baisse de l'albédo de la glace sont peu nombreuses. Plusieurs conditions doivent être réunies: une source de poussière, un processus d'accumulation des poussières au sein de la banquise et l'absence d'une couverture neigeuse. Sur des durées très longues de plusieurs millions d'années, une source de poussière continue, même très faible, modifie les propriétés optiques de la banquise. On pense aujourd'hui que les fines poussières issues du volcanisme et de l'érosion glaciaire ont lentement sali la glace de manière irréversible. Ces poussières, dérivant avec la glace de mer, se seraient accumulées aux basses latitudes, là où la sublimation est la plus forte.

L'ensemble des simulations climatiques intégrant ces conditions proposent une glace de mer dépourvue de couvert neigeux sous 20° de latitude. Et les dernières modélisations numériques, notamment celles réalisées en 2013 par Jason Goodman, du collège Wheaton, dans le Massachusetts, et Dana Strom, du Laboratoire de développement météorologique, dans le Maryland, suggèrent que l'épaisseur d'une banquise équatoriale «salie» pourrait être réduite à 100 mètres.

Malheureusement, la transmission du rayonnement solaire incident reste impossible si l'épaisseur de la banquise dépasse quelques dizaines de mètres. D'autres mécanismes ont dû agir, peut-être conjointement. Parmi les hypothèses avancées pour résoudre cette difficulté, la plus intéressante est celle des cryoconites, proposée en 2000 par Warwick Vincent, de l'université Laval, à Québec, et reprise en 2016 par Paul Hoffman (*voir l'entretien page 32*). Les cryoconites sont des trous qui se creusent dans la glace à la suite de la lente accumulation de fines poussières, plus sombres et donc plus chaudes que la glace ou la neige (*voir la photo page 35*). Ces trous et les zones d'eau liquide qui se forment à proximité, à la surface de la banquise, sont des habitats potentiels pour les organismes photosynthétiques. Les cryoconites permettent aussi un transfert de ➤