

(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

«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 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

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 ➤

À LA RECHERCHE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE EN NAMIBIE



PAUL HOFFMAN
est chercheur émérite
de l'université Harvard

Propos recueillis par PIERRE SANSJOFRE

Quand et comment avez-vous connu la théorie de la Terre boule de neige ?

Joseph Kirschvink m'en a parlé en 1989 lors d'une conférence à Washington. Nous attendions un bus sous une forte canicule. Il en parlait aux gens de façon informelle parce que l'idée lui était venue trop tard pour être incluse dans le programme officiel. Je n'avais jamais travaillé sur le Néoprotérozoïque à cette époque et je n'avais donc pas d'idée préconçue sur cette théorie.

Pourquoi avez-vous choisi de rechercher des traces de la Terre boule de neige en Namibie ?

Cette glaciation a été globale, donc on peut en rechercher des traces dans de nombreuses régions, partout où des roches de l'époque correspondante sont conservées près de la surface de la Terre. Lorsque j'ai décidé d'étudier la géologie du Néoprotérozoïque, en 1993, j'ai choisi de travailler en Namibie pour trois raisons : politique, géographique et géologique.

D'abord, il me fallait un pays en paix et stable. J'étais un nouveau venu dans le domaine et mon premier projet durerait nécessairement plusieurs années. Après son indépendance en 1990, la Namibie apparaissait comme une démocratie représentative multiraciale, gouvernée par un parti doté d'un mandat populaire fort. Mes attentes n'ont pas été déçues.

Ensuite, lorsque l'on étudie des dépôts sédimentaires dans les affleurements (par opposition aux carrières ou aux carottes de forage profond), il est essentiel que la végétation n'obscurcisse pas les roches et que l'on puisse

distinguer les couches tendres et dures. On privilégie donc les déserts et les pentes abruptes de collines. Dans la région de la Namibie que j'étudie, les précipitations annuelles sont inférieures à 20 centimètres et les pentes abruptes abondent sur l'escarpement côtier.

Enfin, en Namibie, il n'y a aucun doute possible sur le fait que si les surfaces les plus chaudes étaient glacées, les plus froides l'étaient aussi : les dépôts glaciaires néoprotérozoïques s'y trouvent dans les sédiments de plate-formes carbonatées marines situées au

Attirer l'attention de
brillants scientifiques
sur la Terre boule
de neige a été ma
principale réussite

niveau de la mer, comme celles du Grand Banc des Bahamas ou du plateau continental du nord-ouest de l'Australie. Or pour des raisons chimiques simples de saturation de l'eau en carbone, les sédiments carbonatés se forment surtout dans les parties les plus chaudes de l'océan de surface, là où l'évaporation est la plus forte. C'est toujours vrai, que le climat mondial soit plus chaud ou plus froid. Aucun sédiment glaciaire ne peut donc avoir glissé d'une montagne, comme au Chili.

Mais il a quand même fallu cinq ans de travail sur le terrain en Namibie pour me convaincre que nos observations étaient inattaquables, que la Terre boule de neige était leur meilleure interprétation et que de nouvelles preuves de la théorie de Joseph Kirschvink existaient, indépendantes de celles qui l'avaient motivé.

Quelle a été votre plus grande découverte sur la théorie de la Terre boule de neige ?

Celle du lien entre l'origine des *cap carbonates* et la théorie climatique qui explique la sortie d'un épisode de Terre boule de neige. Les *cap carbonates* sont des couches spécifiques de carbonates de plusieurs mètres d'épaisseur qui recouvrent directement les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque. Nous avons montré qu'ils sont associés à la fin des épisodes de Terre boule de neige et non à des époques glaciaires plus jeunes. Joseph Kirschvink ne connaissait pas les *cap carbonates*, qui ne figuraient donc pas dans sa théorie.

En fait, c'est mon collègue Dan Schrag, un océanographe géochimiste, qui le premier a compris pourquoi les *cap carbonates* sont une conséquence prévisible de la Terre boule de neige. Mon rôle a été de l'intéresser au problème. Attirer l'attention de personnes brillantes sur la Terre boule de neige a d'ailleurs été ma principale réussite. Cela signifiait généralement les convaincre que le phénomène avait pu se produire.

Vous avez récemment proposé une nouvelle explication de la présence de vie lors d'un épisode de Terre boule de neige. Pourriez-vous l'expliquer ?

Les déserts d'une Terre boule de neige sont situés dans les régions tropicales. Dans ces déserts, la glace se retire des terres à basse altitude par sublimation – conversion directe de la glace en vapeur d'eau. En revanche, l'océan tropical reste couvert de glace parce qu'il gèle par en dessous. Les vents violents de ces régions dégagent de la poussière des terres nues. En tombant, la neige piège la poussière contenue dans l'air, ainsi que les cendres volcaniques, et les dépose notamment dans les zones non désertiques, recouvertes de glace. Le mouvement de la glace transporte la poussière emprisonnée vers l'océan tropical, où elle s'accumule en surface sur la glace, elle-même soumise à