

Quand tous les océans étaient gelés

A la veille de l'ère Primaire, Il y a quelque 600 millions d'années, la Terre aurait été entièrement gelée au moins à cinq reprises. Chaque fois, les glaces auraient fondu à la faveur d'un réchauffement par effet de serre. Emise voici dix ans, l'hypothèse reste controversée. Mais les indices se multiplient...

Joseph L. Kirschvink

est géobiologiste. Il travaille à l'université de Tokyo et au California Institute of Technology, à Pasadena.

Il faut attendre le XX^e siècle pour que les géologues admettent l'existence de glaciations précambriennes

La science devient amusante lorsqu'elle permet de simplifier les choses. Le summum étant d'imaginer une théorie qui rende compte d'une multitude d'observations sans dépendance mutuelle apparente. Ce fut le cas de la théorie de la tectonique des plaques qui, dans les années 1960, permit de réunir des observations paléontologiques, pétrographiques, géophysiques, etc., en un seul et même concept unificateur. De telles avancées conceptuelles sont rares. Mais de nombreux aspects obscurs de l'histoire de

la Terre laissent encore le champ libre à de nouvelles hypothèses. Ainsi, en 1992, j'ai émis l'idée d'une « Terre boule de neige », c'est-à-dire d'une Terre entièrement gelée, pour résoudre l'énigme des dépôts glaciaires de la fin du Précambrien*, la période qui précède la fameuse « explosion cambrienne » pendant laquelle la plupart des lignées animales sont apparues⁽¹⁾. Dix ans après, cette idée provocatrice est toujours l'objet de violents débats.

L'existence de glaciations précambriennes est restée longtemps ignorée. L'Australien Sir Douglas Mawson, de l'université d'Adélaïde, et le Britannique Brian Harland, de l'université de Cambridge, furent les premiers, au milieu du XX^e siècle, à reconnaître leur ampleur exceptionnelle. Indépendamment l'un de l'autre, ces deux éminents géologues avaient repéré dans de nombreux ensembles sédimentaires de l'époque les traces d'anciens glaciers : stries parallèles gravées sur les roches par l'écoulement des glaces, cailloux abandonnés par des icebergs, etc. Plus étrange, D. Mawson et B. Harland avaient trouvé, mélangés aux débris glaciaires, des frag-

ments de roches composées de carbonates de calcium (calcaires) ou de magnésium (dolomites), lesquelles se forment dans les eaux chaudes tropicales. Les glaciers précambriens s'étaient apparemment écoulés sur des plateaux carbonatés comme ceux qui entourent les Bahamas aujourd'hui. Le refroidissement était donc survenu immédiatement après un épisode chaud. Autre observation déroutante : ces dépôts glaciaires se retrouvaient en de nombreux points de la planète, y compris sous les tropiques⁽²⁾ ! Les deux hommes en déduisirent que la glaciation qui les avait engendrés, si elle était unique, avait sans doute été d'une ampleur exceptionnelle, jamais égalée dans l'histoire de la Terre⁽⁵⁾. Les américains Cornelis Klein et Nic Beukes s'aperçurent quelques années plus tard que les glaciations précambriennes coïncidaient aussi avec la réapparition de dépôts d'argiles très riches en fer (les BIF, pour *Banded Iron Formations*) qui avaient disparu depuis plus d'un milliard d'années (fig. 1). Or, leur formation suppose un océan privé d'oxygène. Depuis lors, les observations se sont affinées, et nous pensons aujourd'hui que trois ou quatre événements « Boule de neige » se sont succédé au Néoprotérozoïque*, entre 730 et 590 millions d'années⁽²⁾ et qu'un autre au moins a sévi au Paléoprotérozoïque*, il y a 2,2 ou 2,3 milliards d'années^(4,5).

Valse des continents. Si l'idée de glaciations précambriennes est généralement acceptée par les géologues, l'hypothèse d'événements synchrones, discrets, au cours desquels les glaces seraient descendues jusque sous les Tropiques, est toujours âprement discutée. Les datations restent peu nombreuses. Il est donc difficile d'être certain que les dépôts glaciaires témoignent bien des mêmes événements géologiques. En outre, au Quaternaire, les calottes glaciaires ne sont jamais allées en deçà de 40° de latitude (à peu près au niveau de Chicago et de New York). Au nom du précepte géologique qui veut que « le présent est la clé du passé », les scientifiques ont cherché des solutions moins radicales à ce paradoxe climatique.

Dans les années 1960, la nouvelle théorie de la tectonique des plaques leur offrit une explication évi-

En deux mots

La présence de dépôts glaciaires jusque sous les Tropiques, l'orientation du champ magnétique passé et l'existence d'argiles riches en fer en de nombreux points de la planète suggèrent que la Terre fut, dans sa jeunesse, et, au moins à cinq reprises, complètement couverte de glaces. Mais en s'accumulant dans l'atmosphère, le gaz carbonique émis par les volcans aurait provoqué un effet de serre exceptionnel et, par conséquent, la fonte rapide des glaces. C'est l'amélioration du climat après 590 millions d'années qui aurait favorisé l'émergence des premières lignées animales et la fameuse « explosion cambrienne ».



Des mers tropicales précambriennes coincées sous plusieurs centaines de mètres de glace ? Et des pôles (ici, l'Antarctique) sous plusieurs milliers de mètres ? L'hypothèse, pourtant séduisante, n'est toujours pas admise par la communauté scientifique. © Wisniewski W./Foton Bios

* Le **Précambrien** s'étend de la formation de la Terre, il y a 4,55 milliards d'années à environ 543 millions d'années.

* Le **Protérozoïque** est le dernier étage du Précambrien. Il couvre la période de l'histoire de la Terre qui va de 2,5 milliards d'années à environ 543 millions d'années. Il se subdivise à son tour en **Paléo-protérozoïque** (2,5 à 1,6 milliard d'années), **Mésoproterozoïque** (1,6 milliard à 900 millions d'années) et **Néo-protérozoïque** (900 à 543 millions d'années).

* **L'obliquité** est l'angle que fait l'axe de la Terre avec l'écliptique. C'est elle qui module la quantité d'ensoleillement reçue aux différentes latitudes suivant les saisons.

dente: carbonates et dépôts glaciaires résultaient tout simplement du mouvement passé des continents. Les premiers s'étaient formés alors que les masses continentales étaient à l'équateur, et les seconds lorsqu'elles s'étaient rapprochées des pôles. Faute de datations, le scénario ne semblait pas impossible. Il permettait en tout cas d'éviter les glaciers tropicaux. Encore fallait-il trouver les preuves de ces déplacements anciens. L'étude du champ magnétique passé (ou « paléomagnétisme »), bien que balbutiante, était à ce titre riche de promesses. Les géophysiciens s'étaient aperçus que certains minéraux (comme la magnétite ou l'hématite) acquièrent, au moment de leur formation, une aimantation dont la direction et le sens sont ceux du champ magnétique ambiant. Or, celui-ci varie avec la latitude : il est pratiquement horizontal à l'équateur et vertical aux pôles. En mesurant le champ magnétique des roches anciennes, il était possible de retrouver la latitude à laquelle elles s'étaient formées. Et donc de reconstituer le cheminement des continents.

Les premiers résultats que Brian Harland obtint en 1961 étaient en faveur d'une glaciation tropicale: les échantillons prélevés au Groenland et au Spitzberg exhibaient en effet un champ magnétique presque horizontal, typique des basses latitudes. Le Belge Lucien Cahen obtint des résultats similaires peu de

temps après. Mais cette conclusion déclencha une vive polémique. Pouvait-on se fier à une technique qui, à plusieurs reprises, avait été mise en défaut? Maintes fois, il était apparu que le magnétisme mesuré n'était pas d'origine et qu'il avait été acquis postérieurement alors que la roche avait été chauffée. Et sans mesures paléomagnétiques sur les dépôts glaciaires eux-mêmes, impossible d'exclure l'existence de dérives continentales rapides entre l'équateur et les pôles.

Moins de soleil. D'autres scénarios furent proposés dans lesquels les glaciers pouvaient atteindre l'équateur sans pour autant que la Terre soit complètement gelée. Par exemple, George Williams, de l'université d'Adélaïde, défendit l'idée selon laquelle l'obliquité* de la Terre était plus forte au Précambrien qu'elle ne l'est aujourd'hui. En conséquence, les régions équatoriales recevaient moins d'ensoleillement que les pôles. Que cela ait pu engendrer des glaciers aux basses latitudes fut très chaudement discuté⁽²⁾.

L'hypothèse d'une glaciation tropicale n'était pas non plus admise par les modélisateurs du climat. A la fin des années 1960, en pleine guerre froide, planait la menace d'un holocauste nucléaire et, avec elle, celle d'un bouleversement du climat planétaire. Des modèles numériques furent donc développés

Dans les premiers modèles, faute d'un mécanisme connu pour sortir de la catastrophe glaciaire, le Globe gelé ne fondait jamais !

*Le **bilan radiatif** est la différence entre le rayonnement reçu et celui réémis par la Terre.

*La **photosynthèse** est l'ensemble des réactions par lesquelles les plantes fabriquent les sucres nécessaires à leur croissance à partir du gaz carbonique et de l'eau grâce à l'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle.

*Lorsque les **roches silicatées** se dégradent, le CO₂ est converti en ions carbonates qui, entraînés vers les océans, vont se combiner à des ions calcium et magnésium pour former des sédiments carbonatés. Le carbone est alors stocké dans les carbonates.

aux États-Unis et en Union soviétique afin d'en prévoir les effets. C'est dans ce contexte que le Russe Mikhaïl Budyko développa un modèle de bilan radiatif*. Ses résultats étaient surprenants : la Terre gelaient entièrement dès que les calottes glaciaires atteignaient 30° de latitude⁽⁶⁾. La raison en est purement physique. La glace, blanche et brillante, réfléchit fortement le rayonnement solaire. De ce fait, la quantité d'énergie solaire absorbée par la surface terrestre diminue, le refroidissement initial s'intensifie et la couverture de glace s'épaissit. Avec ce mécanisme, appelé « rétroaction de l'albédo des glaces », la Terre ne cesse de se refroidir et la glace d'avancer dans un cycle sans fin. D'après les calculs de Budyko, les températures pouvaient ainsi descendre jusqu'à environ -50°C et la glace s'accumuler sur 1,5 km d'épaisseur à l'équateur et sur 3 km aux pôles ! Cependant, le Globe gelé de Budyko ne revenait jamais à la normale. Comme aucun mécanisme connu ne pouvait le sortir de cette catastrophe glaciaire et que la Terre n'est plus gelée, les paléoclimatologues en déduisirent qu'un tel scénario ne s'était jamais déroulé : il fut considéré comme une solution imaginaire pour les modèles climatiques...

Magnétisme originel. Il fallut attendre près de vingt ans pour que l'hypothèse de glaciations tropicales revienne sur le devant de la scène. En 1986, les Australiens George Williams et Brian Embleton publièrent la première étude paléomagnétique vraiment convaincante : ils montrèrent que l'aimantation des fines couches glaciaires d'Elatina, au sud de l'Australie, était fossilisée dans des grains d'origine sédimentaire et qu'elle n'avait jamais été perturbée par des processus thermiques⁽⁷⁾. Or, cette aimantation était... « équatoriale ». Ils étaient à deux doigts de

prouver définitivement la présence de glaciers aux basses latitudes. Mais il manquait encore un élément essentiel : le moment exact où ce magnétisme avait été acquis.

Regroupement équatorial. C'est à cette époque que je suis entré en scène. En 1987, Bruce Runnegar, de l'université de Californie, à Los Angeles, était allé en Australie, sur le site d'Elatina, et avait collecté pour moi étudiant et moi-même un bel échantillon. Les lits de sédiments y étaient bien visibles, de même que les plissements qui les affectaient (fig. 2). Nous avons montré que le magnétisme avait été acquis avant que les sédiments ne soient plissés, lorsqu'ils étaient encore mous, vraisemblablement au moment de leur dépôt. La preuve tant recherchée était là, sous nos yeux. Cette petite étude, qui fit l'objet d'un résumé dans les actes d'un colloque⁽⁸⁾, stimula les Australiens qui se lancèrent dans l'analyse complète du paléomagnétisme d'Elatina⁽⁹⁾. Nos premiers résultats furent confirmés. Mais la polémique se poursuivit. De nombreux géologues refusaient toujours l'idée de glaciers tropicaux. Cependant, Elatina n'était pas unique en son genre, et d'autres enregistrements allaient bientôt révéler des faits semblables⁽¹⁰⁾.

Mais revenons en 1987. Je faisais alors partie du groupe de recherche sur la paléobiologie du Précambrien (PPRG) que J. William Schopf et Bruce Runnegar venaient de créer à l'université de Californie, à Los Angeles. J'étais chargé de rassembler les données disponibles en paléontologie, géologie et géomagnétisme, afin de reconstituer le déplacement des continents à la fin du Précambrien. Ce faisant, je m'aperçus que de larges zones continentales se trouvaient à l'équateur lors des glaciations⁽¹¹⁾ (fig. 3). Finalement, le scénario prédit et rejeté par Mikhaïl Budyko était-il possible ? J'imaginai alors la Terre, complètement

La baleine, cousine du mouton

Epilogue de cinquante ans de controverses sur la famille originelle des ancêtres terrestres de nos cétacés aquatiques. Deux squelettes datant du début du tertiaire, découverts au cours de l'été 2001 au Pakistan, ont permis de trancher : nos cétacés, tels que la baleine, le dauphin ou le marsouin, descendent bien des artiodactyles, groupe constitué d'ongulés herbivores au nombre impair d'orteils, qui compte parmi leurs descendants les hippopotames, les vaches et les moutons.

Cette filiation avait la faveur des biologistes moléculaires, mais elle était dénoncée par les paléontologues qui, à partir de correspondances morphologiques sur les dents et les oreilles, postulaient que nos cétacés étaient apparentés au groupe des mésochyniens, ongulés carnivores du début de l'époque tertiaire dont il n'existe plus de descendant.

Les squelettes d'*Ichthyolestes* et *Pakicetus* découverts au Pakistan par l'équipe de Johannes Thewissen, de l'université Northeastern dans l'Ohio, présentent le mérite d'être, pour la première fois, quasiment complets, et d'être pourvus d'un petit os des chevilles, l'astragale. A l'origine d'une grande mobilité du pied, celui-ci apporte la preuve que les ancêtres de nos cétacés étaient d'intrépides coureurs terrestres. « C'est l'une des découvertes les plus importantes du XX^e siècle en paléontologie des vertébrés, estime Christian de Muizon, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Comme l'Archéoptéryx pour les oiseaux ou l'Australopithèque pour l'homme, *Pakicetus* constitue un élément clé dans l'évolution des espèces. »

Quant au plus proche parent actuel des cétacés, la question reste posée. Est-ce l'hippopotame, comme le pensent les biologistes moléculaires ? L'étude morphologique faite par l'équipe de J. Thewissen ne permet pas de trancher.

E. B.

J.G.M. Thewissen et al., *Nature*, 413, 277, 2002 / F. Spoor et al., *Nature*, 417, 163, 2002.



Pakicetus

© Illustration Carl Buell



Balaenoptera acutorostrata

© Nachoum/Photoceans

gelée, ressemblant à une énorme boule de neige. N'y avait-il vraiment aucun moyen de sortir d'une telle catastrophe glaciaire? Les modèles sont censés expliquer les observations, pas les exclure! Il me vint à l'esprit qu'une glaciation, même globale, n'avait pu empêcher les volcans de fonctionner et de rejeter du gaz carbonique. En temps normal, ces émissions sont compensées à la fois par la photosynthèse* et par l'érosion des roches silicatées* qui jouent le rôle de pompe à carbone. Mais dans le cas d'une Terre entièrement gelée, le cycle hydrologique aurait été inter-

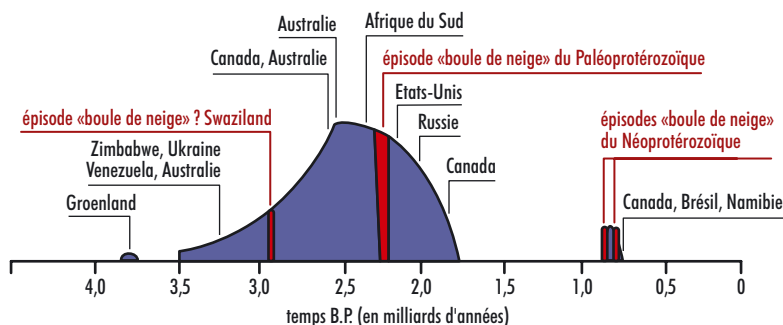


Figure 1. Distribution des dépôts d'argiles très riches en fer (BIF pour Banded Iron Formations) et des principaux épisodes glaciaires. (D'après Beukes et al.)

rompu, et le gaz carbonique se serait accumulé dans l'atmosphère. Résultat, la surface de la Terre se serait réchauffée par effet de serre, la glace aurait fondu, mettant fin à la glaciation.

L'hypothèse était séduisante. En outre, elle expliquait les dépôts riches en fer, les fameux BIF dont nous avons déjà parlé. Le carcan de glace bloquait les échanges entre l'océan et l'atmosphère. Mais en profondeur les cheminées hydrothermales continuaient à fonctionner: l'eau de mer circulait à l'intérieur de la croûte océanique, se réchauffant au contact du magma avant de remonter sous forme d'eau chaude chargée d'éléments métalliques (dont le fer) lessivés des roches traversées. Lorsque la glace a fondu, les échanges avec l'atmosphère ont repris et l'eau s'est réoxygénée. Le fer a réagi avec l'oxygène (il est insoluble en présence d'oxygène) et a précipité massivement sur le fond de l'océan (fig. 1). Les dépôts riches en fer plus anciens ont dû se former lorsque les océans et l'atmosphère renfermaient peu d'oxygène.

Mon émotion était à son comble. Petit à petit, les pièces du puzzle s'agençaient: le magnétisme fossile, l'étrange composition des blocs de roches détritiques retrouvés dans les dépôts glaciaires et les BIF pouvaient s'expliquer par un seul et même concept que je baptisais «Snowball Earth» ou «Terre boule de neige⁽¹⁾», pour le distinguer de celui de «Terre blanche» des modélisateurs et pour souligner qu'il s'agissait d'une hypothèse testable.

Mais, en cette fin des années 1980, le scénario était encore incomplet. En particulier, j'ignorais quelles

teneurs en gaz carbonique permettaient de sortir de l'événement boule de neige. En 1992, Jim Kasting, de l'université de Pennsylvanie, qui faisait également partie du PPRG, calcula qu'il fallait une pression partielle en CO₂ de 0,12 bar (soit environ 400 fois plus qu'actuellement). Cette valeur était compatible avec une accumulation du gaz dans l'atmosphère pendant plusieurs millions d'années par dégazage volcanique. A l'époque, nous ne nous étions pas vraiment inquiétés des conséquences possibles de telles concentrations. On sait aujourd'hui que cet excès de gaz carbonique fut immédiatement éliminé et précipité sous forme de carbonates. Dès la fin des années 1980, les géologues avaient constaté que d'épaisses séquences de carbonates coiffaient les dépôts glaciaires néoproterozoïques. En 1998, Paul Hoffman et Daniel Schrag, de Harvard, montrèrent que les carbonates de Namibie s'étaient probablement déposés, alors que la température globale était de 50°C. Et qu'ils avaient les mêmes rapports isotopiques que le carbone émis par les volcans⁽¹²⁾.

Le manganèse issu du dégel. Quoi qu'il en soit, les travaux de Hoffman et de ses collègues suscitèrent encore plus notre intérêt. Il fallait regarder de plus près le premier événement Boule de neige, celui du Paléoproterozoïque. Des calculs similaires démontrèrent qu'il avait fallu une pression de CO₂ d'environ 0,6 bar (près de 2000 fois le niveau actuel) pour sortir de cet événement qui avait duré environ 70 millions d'années! Nous nous sommes donc rendus en Afrique du Sud pour y chercher d'éventuels indices d'un dégel rapide^(4,5). Là, juste au-dessus des dépôts glaciaires et des BIF, nous avons découvert une couche d'oxydes de manganèse épais d'une cinquantaine de mètres. Connue sous le nom de «Kalahari Manganese Field», elle représente 80% des réserves mondiales de ce métal! Nous avons réalisé à ce moment-là que tous les autres dépôts de manganèse d'origine sédimentaire connus étaient également associés aux BIF néoproterozoïques et donc à la présence de glace sous les Tropiques. Le cation

Les dépôts de fer et de manganèse résultent de la réoxygénation des océans, et donc du dégel brutal de la planète

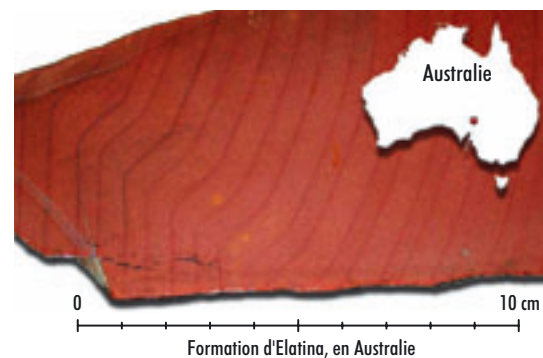


Figure 2. L'analyse du champ magnétique passé des dépôts glaciaires d'Elatina, en Australie, a fourni la première preuve convaincante en faveur d'une «Terre boule de neige». Elle montre en effet que les glaciers avaient atteint l'équateur.

La Recherche a publié :
(1) Hélène Le Meur, «Le Globe terrestre en boule de neige», septembre 2000.

Un bilan en faveur d'une Terre gelée

J'ai résumé dans ce tableau les observations géologiques mentionnées dans le texte et donné mon avis (subjectif !) sur le fait qu'elles sont ou non expliquées par les différentes hypothèses. L'hypothèse d'une modification de l'obliquité de la Terre ne rend compte que des dépôts glaciaires des basses latitudes. La Terre boule de neige fondue n'offre pas d'explication valable pour les BIF (Banded Iron Formations), les niveaux de manganèse ou des calottes de carbonates, qui tous supposent un océan privé d'oxygène. En outre ce scénario n'explique pas comment sortir d'une glaciation.

	Terre boule de neige	Boule de neige fondue	Obliquité plus élevée	Glaciation phanérozoïque
Déchets de carbonates	oui	oui	non	non
Dépôts glaciaires à basses latitudes	oui	oui	oui	non
Association avec les BIF	oui	non	non	non
Association avec les BIF et dépôts de manganèse	oui	non	non	non
Présence de calottes de carbonates	oui	non	non	non

*Le Phanérozoïque s'étend de 543 millions d'années à nos jours.

(1) J.L. Kirschvink, *Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: the Snowball Earth; in the Proterozoic Biosphere: a Multidisciplinary Study*, Schopf J.W. et al. (eds), Cambridge University Press, 1992, p. 51-52.

(2) P.F. Hoffman et D.P. Schrag, *Terra Nova* 2002, sous presse.

(3) M.J. Hambrey et W.B. Harland, *Earth's Pre-Platocene Glacial Record*, Cambridge, United Kingdom (GBR), Cambridge Univ. Press, 1981.

(4) D.A. Evans et al., *Nature*, 386, 262, 1997.

(5) J.L. Kirschvink et al., *P.N.A.S.*, 97, 1400, 2000.

(6) M.I. Budyko, *Tellus*, 21, 611, 1969.

(7) B.J.J. Embleton et G.E. Williams, *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 419, 1986.

(8) D.Y. Sumner et al., *EOS, Trans. American Geophysical Union*, 68, 1251, 1987.

(9) P.W. Schmidt et al., *Earth and Planetary Science Letters*, 105, 355, 1991.

(10) D.A.D. Evans, *American Journal of Science*, 300, 347, 2000.

(11) J.L. Kirschvink, *A Paleogeographic Model for Vendian and Cambrian Time; in the Proterozoic Biosphere: a Multidisciplinary Study*, Schopf J.W. et al. (eds), Cambridge University Press, p. 567-581, 1992.

(12) P.F. Hoffman et al., *Science*, 281, 1342, 1998.

(13) W.T. Hyde et al., *Nature*, 405, 425, 2000.

(14) B. Runnegar, *Nature*, 405, 405, 2000.

métallique Mn^{2+} est commun dans les fluides hydrothermaux mais son dépôt requiert quantité d'oxygène moléculaire. Or, celui-ci est essentiellement produit par la photosynthèse.

Les dépôts de Kalahari attestent donc son existence dès cette époque. Ils sont même la plus ancienne preuve directe de l'existence d'oxygène moléculaire de l'histoire de la Terre. Avant l'apparition de la photosynthèse, l'atmosphère était fortement réductrice. Gaz sulfurés (comme H_2S et SO_2) et méthane (dont l'effet de serre est l'un des plus forts) y flottaient librement.

Zones refuges. On ne sait toujours pas très bien ce qui a déclenché les glaciations du Néoprotérozoïque. En revanche, c'est probablement l'augmentation de la concentration de l'oxygène dans l'air qui a été à l'origine de la première glaciation globale. L'évolution progressive de la composition de l'atmosphère aurait en effet détruit l'effet de serre lié au méthane. Stimulés par cette masse d'observations, les modélisateurs ont cherché à simuler les événements Boule de neige de façon plus réaliste. Voici deux ans, William Hyde, du département d'océanographie de l'université A&M du Texas, a couplé un bilan radiatif à un modèle d'évolution des calottes de glace⁽¹¹⁾. De façon surprenante, il a obtenu une solution quasi stable dans laquelle les glaces atteignent l'équateur tout en épargnant de larges zones équatoriales (on parle de «boule de neige fondue»)⁽¹³⁾. Une solution qui plaît beaucoup aux géobiologistes car ces zones auraient pu servir de refuge aux premières lignées animales. N'oublions pas que celles-ci seraient apparues, d'après les biologistes moléculaires, plu-

sieurs centaines de millions d'années avant les glaciations (quelques dizaines de millions d'années seulement pour les paléontologues)⁽¹⁴⁾. Reste que les fortes concentrations en CO_2 nécessaires pour sortir d'un épisode Boule de neige auraient sans nul doute été fatales aux animaux utilisant les protéines de la famille des globines (l'hémoglobine, la myoglobine, etc.) pour le transport de l'oxygène. En outre, le modèle de Hyde ne rend pas compte de la plupart des observations (voir tableau).

Je soupçonne pour ma part un scénario plus complexe dans lequel une glaciation initiale du genre de celles qui se sont déroulées plus tard, au Phanérozoïque*, aurait progressivement basculé vers un événement de type Boule de neige assez long. Celui-ci se serait terminé par un épisode glaciaire particulièrement intense. Cela suppose bien sûr que certains organismes aient pu survivre à ces conditions extrêmes. Mais il semble tout à fait possible que des protozoaires aient pu se réfugier dans les profondeurs océaniques, à proximité des sources hydrothermales. Et c'est l'amélioration du climat après la dernière glaciation, vers 590 millions d'années, qui aurait favorisé l'émergence des premières lignées animales. La balle est désormais dans le camp des biologistes et des paléontologues.

J.L. K. ■

Pour en savoir plus

● La page de Paul Hoffman sur la Terre en boule de neige : www-eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/snowball_paper.html

● BBC Horizon : www.bbc.co.uk/science/horizon/snowballarth.shtml